

中国读本



中国的火山、温泉和地热能

廖志杰 著

什么是火山，中国何处有火山，中国温泉有多少，温度有多高，哪里最常见，什么是地热能，我们是否很好地利用了？本书将提供丰富的关于火山、温泉和地热方面的知识。

中国国际广播出版社

图书在版编目（CIP）数据

中国的火山、温泉和地热能 / 廖志杰著. —北京：中国国际广播出版社，2012.7
（中国读本）
ISBN 978-7-5078-3400-0

Ⅰ. ①中… Ⅱ. ①廖… Ⅲ. ①火山－中国－普及读物 ②温泉－中国－普及读物 ③地热能－中国－普及读物
Ⅳ. ①P317-49 ②P314.1-49 ③TK521-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第023026号

中国的火山、温泉和地热能

著　者	廖志杰
责任编辑	张　婧
版式设计	国广设计室
责任校对	徐秀英
出版发行	中国国际广播出版社（83139469　83139489[传真]）
社　址	北京复兴门外大街2号（国家广电总局内） 邮编：100866
网　址	www.chirp.com.cn
经　销	新华书店
印　刷	北京广内印刷厂
开　本	640×940　1/16
字　数	110千字
印　张	12
版　次	2012年7月 北京第一版
印　次	2012年7月 第一次印刷
书　号	ISBN 978-7-5078-3400-0/P·2
定　价	22.00元

再版前言

我的小册子《中国的火山、温泉和地热资源》（中级科普读物）写于20世纪80年代末期，1990年由科普出版社出版。当时我国地热资源的开发还处于方兴未艾之际，羊八井地热电站的建成成为了照耀青藏高原的一颗明珠；地热能的直接利用主要还是在医疗洗浴方面，耗能稍大的城市采暖和工业利用规模尚小。2010年末，中国国际广播出版社决定再版它，然而20年已经过去了！自上一世纪90年代以来，中国发生了有目共睹的大变化，在市场经济的推动下，这20年是中国飞跃发展的20年，也是中国地热资源的开发利用得到进一步发展的20年，地热的开发对促进当地经济的发展起到了显著作用。那么，这20年来我国地热发展的态势有什么特点呢？可以用一句话来概括：直接利用飞速发展，地热发电裹足不前。具体表现在：1. 20年来地热直接利用的装机容量和年用热量平均增长了4.5倍。1990年它们分别为1 919MWt（兆瓦热功率）和16 981TJ/a（10^{12}焦耳/年），到2010年增长到8 898MWt（世界第二）和75 348.3TJ/a（世界第一）。2. 20年来地热直接利用变化比较大的是传统的地热采暖，1990年采暖面积只有190万平方米，到2009年曾达3 020万平方米，差不多增长了16倍。3. 20年来地热直接利用变化最大的是地源热泵的利用。200米以上的浅层地热能，过去不属于传统地热能（>25℃），进入21世纪以后受到了各界的青睐，也得到了地热界的认可，有了飞速的发展。在中国采用地热源泵的建筑面积从2006年的738万平方米到2008年增至6 200万平方米。4. 如果说1971年2月28日在北京氧气厂钻成的热水井是我国在沉积盆地第一眼直接利

用的热水井，到2010年全国就有了2 239口，它们都成了一口口“人造温泉”，以满足人们随着经济的发展对提高生活水平的要求。5. 如果说1993年中国12个地热电站的地热发电的总装机容量是32.466MWe（兆瓦电功率）（含台湾两个地热电站的3.3MWe），到2010年则下降到仅剩羊八井的24.18MWe。不增反降，羊八井成了一个老当益壮的地热电站。鉴于这些变化，在接到再版的信息时，我既感到高兴，也备感压力，我必须去搜集新的资料，以反映我国地热能利用的新水平，同时有可能修正1990年版中的错误（如当时就误将广东阳江横岗仔当作沸泉）。因此，第九、第十、第十一等章是根据最新的资料完全重写的。鉴于此，书名改了一字。现在书稿修改的任务总算完成，它将呈现在国人面前，敬请批评指正。

作　者

辛卯年春节于北京大学燕北园

目　录

小引

中国很少见到正在喷发的火山，也没有像美国黄石公园那样壮观的天然温泉公园。其实，在中国，火山并不少；温泉的数目更是多。如果你想了解什么是火山？中国何处有火山？中国温泉有多少？温度有多高？哪里最常见？什么是地热能？我国是否很好地利用了？那么，就请你读一读这本小册子吧！当你合上书页之时，如果你感到增添了一些有趣的、必要的知识，这就算笔者没有白费心血了。

那么，从哪里开始呢？

就从中国稀有的火山记录开始吧！

第一章

中国稀有的火山记录

火山，是一种普通的自然现象。在太阳系中，不仅地球有火山，月球有，其他行星有，其他行星的卫星也有。我们的东邻日本、菲律宾以及南面的印度尼西亚都可称为“火山之国”。近几年，地球上到处在闹火山，一会儿是美国圣海伦斯火山的喷发；一会儿是菲律宾马荣火山的复苏；而位于“中美洲火山走廊”的尼加拉瓜的马萨亚火山不流岩浆而只冒烟，且百多年来，持续不断。在中国，火山却异常平静。被茫茫林海包围的白头山，巍峨矗立，风光秀丽，天池像一块碧玉镶嵌于山巅，平静如镜。莽莽昆仑之中的火山，则任凭风沙年复一年的掩埋，而无动于衷。难道中国的活火山就如此之少？的确，在我们祖先留下的浩瀚文海中，有关火山的报道实在稀有。

在2000多年前的《山经》之中，曾有“南望昆仑，其光熊熊，其气魂魂”的记述。宋朝时，因山西河曲、偏关等地有“火山”，因而建立了“火山军”的行政区域。上述记录是不是有关火山的报道？值得研究。后来经过许多人的研究，认为大同西部一带的“火山”并不是真正的火山，只不过是地下的煤自燃所引起的现象。

在我国的古代文献中，有关火山的报道仅有两次，都是关于我国黑龙江省德都县五大连池区两座火山喷发的情况。

据清朝的《黑龙江外记》记载：“墨尔根（今嫩江县）东南，一旦地中忽出烟火，石块飞腾，声震四野，越数日火熄，其地遂成池沼，此康熙五十八年事（公元1719年）。”

另据康熙六十年（公元1721年）江苏吴江县人吴祳臣所著的《宁古塔纪略》一文的附录《边徼纪闻》中所记：“城外东北五十里有水荡，周围三十里，于康熙五十九年（公元1720年）六、七月间，忽然烟火冲天，其声如雷，昼夜不绝，声闻五六十里；其飞出者皆黑石、硫磺之类，经年不断，竟成一山，直至城廓。热气逼人三十余里，只可登山而望；今热气渐衰，然数里之中，人仍不能近。天使到彼查看，亦只能远望而已，嗅之惟硫磺气。至今如此，无有识之者。”

五大连池火山原名乌云和尔冬吉火山（金代女真语），意即九座火山。目前五大连池共有 14 座火山，以北东向和北西向呈井字形排列，其中以老黑山和火烧山的火山岩保存最为新鲜，基本未受风化，因此上述报道可推断为是这两座火山在康熙五十九年和康熙六十年喷发的情况。是否在金朝至康熙五十八年间还有三座火山喷发过则未见任何报道。

在东北的众多火山中，另一个最著名的是长白山中的白头山。关于白头山火山喷发的情况，在我国历史文献中虽无记载，却见于朝鲜的历史文献中，当时朝鲜的封建王朝叫李朝，在 1392 ~ 1863 年的 450 年间记载了三次火山喷发。

第一次喷发是在明万历二十五年（公元 1597 年）八月二十六日，据记载“有放炮之声；仰见则烟气张天，大如数搂之石，随烟折去，飞过火山后，不知去处”。同时，天池附近发生地震，泉水变红，冒出大量红色泥水。

第二次是在康熙七年（公元 1668 年）四月，白头山附近下了一场“雨灰”。

又过了 34 年，即公元 1702 年 4 月 14 日（相当于清康熙 41 年），白头山火山又发生了一次新的喷发，据记载：“午时，天地忽然晦暝，时或黄赤，有同烟焰，腥臭满室，若在烘炉中。人不堪熏热。四更后消止。而至朝视之，则遍野雨灰，恰似焚蛤壳者……同月同日，稍晚后，烟雾之气，忽自西北，天昏地暗，腥膻之臭袭人之衣裙……”（见图 1—1）

1998 年刘若新等根据白头山的浮岩所夹的炭化木的 ^{14}C 年龄测定，认为：“天池火山最近一次大喷发的年代为公元 1215 ± 15 年。而此前另一次大喷发可能发生于距今 4150 ± 80 年，即公元前 2155 年左右。在公元 1215 ± 15 年大喷发之后，于公元 1668 ~ 1702 年曾发生多次中、小规模喷发”。而本文提到的 1597 年的喷发，却认为不能肯定是火山喷发，而可能与地震活动有关。

长白山的火山喷发均早于五大连池在康熙五十九年（公元 1720 年）的喷发。自 1720 年之后，在中国 960 万平方公里土地上又经过了

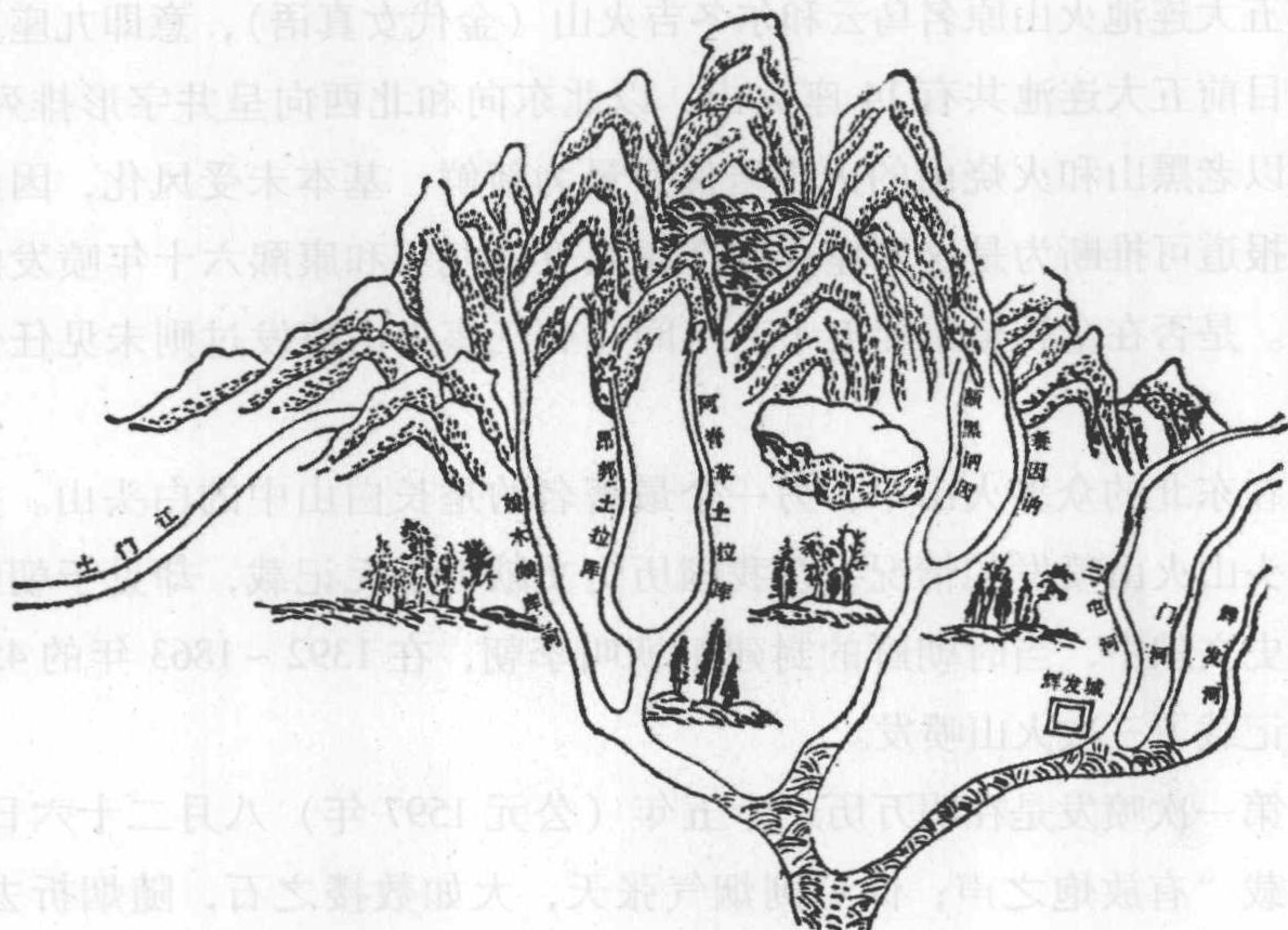


图 1—1　康熙皇帝钦定《盛京通志》中的长白山图

230 年的沉寂，到 1951 年再一次被打破了。在渺无人迹的茫茫昆仑，大批军民沿着由新疆于田首次进军阿里的道路，企图修筑一条新藏公路，正是酣战昆仑的战士亲身远眺了这一次火山的喷发，否则，在那只有藏羚羊出没的罕无人迹的荒原，那次喷发也绝不会为人所知。

该处火山位于昆仑山区的一个山间盆地内，那里有两个湖泊，分别叫做阿奇克库尔和乌鲁克库勒，附近有四座截头圆锥状火山锥，称为“乌鲁克库勒火山群”。在 20 世纪初叶，许多西方的探险家们踏上了青藏高原，较早的一份关于阿奇克库尔附近的火山的记录是德国动物学家促格迈尔搞的，他描述了火山锥的形态和巨大的熔岩流。1942 年中国地形测量员杨某也到过那里，取回岩石标本，送到苏联，由加贝耶娃分析研究，其结果发表在《亚洲地质》论文集中。

1950 年夏天，我国地质学家王恒生随进藏部队到达了阿奇克库尔，对火山口和熔岩流进行了观察，认为喷出的是安山岩。1951 年 5 月 27 日，参加修筑新藏公路的解放军某部三团二营的战士，曾经目睹了其中一座火山喷发的情景。随后，该营干部、战士多人再次到火山口查看。战士们反映，爆发时发出巨响，伴有烟灰呈圆柱状自山顶喷出，

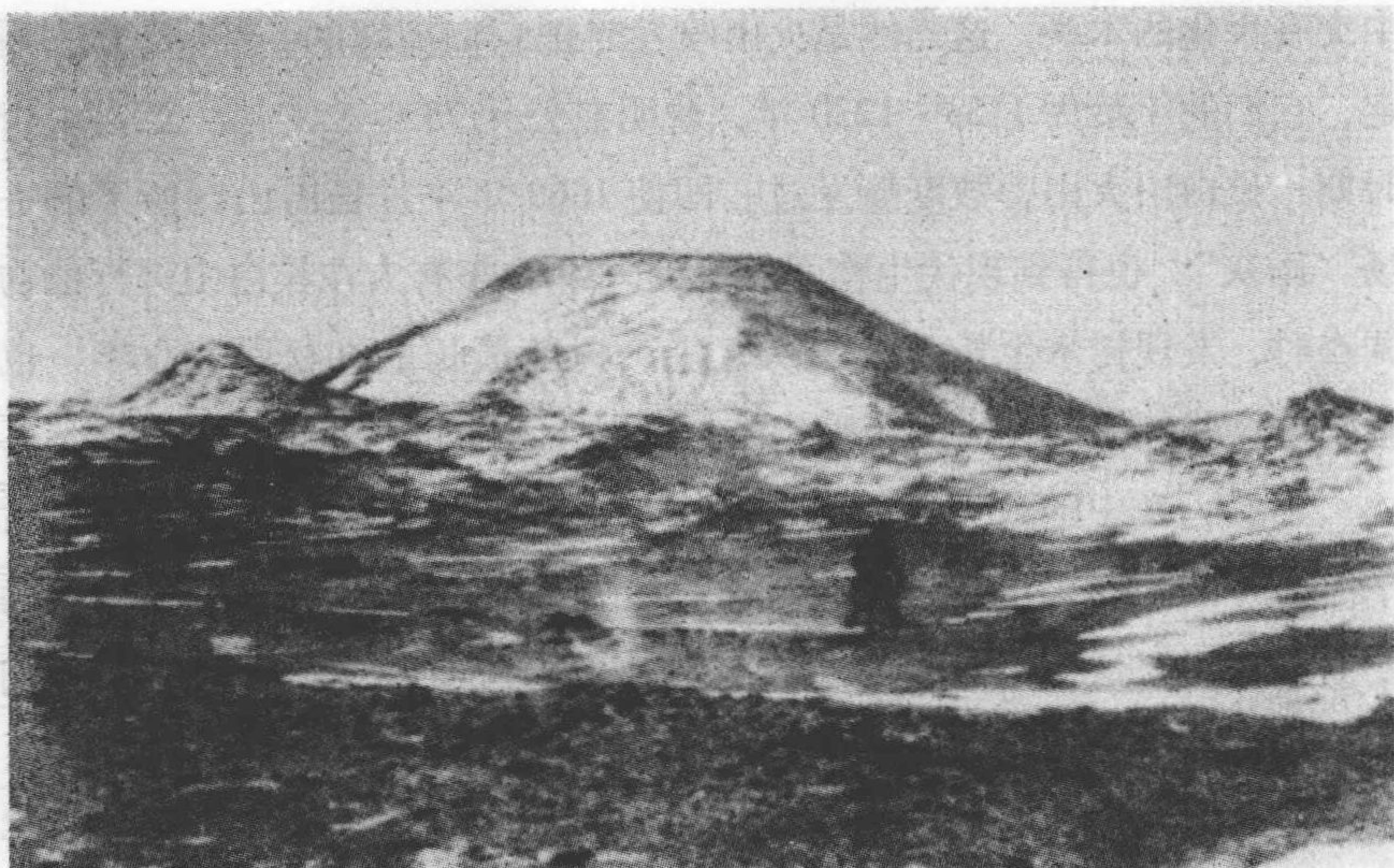


图 1—2　新疆昆仑山脉之中乌鲁克库勒火山群中的卡尔达西（阿什）火山，1951 年 5 月 27 日曾一度喷发（章铭陶摄）

继而飞出石块。至于是否有熔岩流溢出，说法不一。1976 年 10 月，中国科学院青藏高原科学考察队地热专题组曾到火山区考察，并千方百计希望找到火山喷发时的目击者，但未能如愿。据当时担任营教导员的秦志坚同志说，因为听到战士们反映有座山冒烟，大约在半个月之后他带领几名干部去看了一下，见到一片像是烧过的红黑色石头。

1976 年的考察详情已见于《西藏地热》一书中。这里所引用的一张照片就是 1951 年曾经再度喷发的那座火山锥。从照片（图 1—2）可知，火山锥位于一个已破坏的火山锥之内，可见这里曾发生过多次喷发。而上面提到的两个湖泊，完全是由火山喷发出的熔岩堵塞河道形成的壅塞湖。

无论是新疆昆仑山脉中的火山，还是东北长白山火山和五大连池火山，以及其他许许多多火山，它们大规模喷发时都发生在人口稀少的边远之地，火山的喷发似乎都与辽阔中原的戎马倥偬、军阀混战和改朝换代没有什么关系。因此，边远地区这些火山的喷发，在历史的记录中都没有或难得保留下来，但是大自然却为我们留下了难得的记载。如长白山火山顶部覆盖有一层灰黄色的 40 米厚的粗面质浮岩，其

中夹有炭化的木头，这当然是火山喷发时把它们掩埋的，经^{14}C方法测定，它们的年龄为1153～1230年，说明在公元752～829年，即在中唐时期，长白山火山曾数度喷发过。即使1668年4月长白山区所下的一场“雨灰”，也得到现代生物学的旁证。1916年有人在长白山进行植物调查时，发现树木生长于火山灰之上，树龄最长的红松是250年，也就是说这些红松是在火山灰喷出不久就马上在上面生长的。

当然，在中国数千年的文明史中，大陆本土上火山的喷发，与太平洋火环诸国的火山活动比较起来，特别是与东邻日本相比较，的确要少得多。但是否就是上面所述寥寥数次，目前就难下结论了。特别是自人类出现以来，在史前的数百万年的历史长河中，我们的祖先，是否在熊熊烈焰的火山之前感到无比的惊吓？在下面适当的时候，将回答这一问题。

第二章

截头圆锥状的山形

一　从石龙岩和粟雨说起——火山的喷出物

地下的岩浆沿地壳中的裂隙喷出地表，形成火山。在火山喷发之时，各个火山都有不同的特点。有的火山，只见到团团浓烟从那圆锥形的山顶滚滚涌出；有的喷发非常频繁，但异常温和，无爆炸之势，只见熔岩宁静如泉涌；有的则相反，爆炸猛烈，一次喷发会把高耸入云的锥状山体炸得不翼而飞；有的火山只喷出浓烈令人窒息的气体；有的却喷出厚厚的雨灰，覆盖了山峦、村庄、道路与溪流；有的只见滚滚赤热的熔岩流沿着斜坡，蜿蜒曲折一泻数十里；有的只见高热岩浆从火山口喷出后，熔浆中夹杂有大量的气体，以极高的速度沿着山坡往下倾泻，由于岩浆细粉和上升气体的混合，形成漩涡，犹似云霭从天而降，这是最险的"发光云"，如同大炮发射一样猛烈，荡涤着大地的一切。此外，在火山旁边还常常伴有高温的喷气孔、硫质气孔和高温沸泉等。

关于火山喷出的雨灰，或称雨豆，或称雨粟，我们祖先则记载不少。自公元前 192 年（汉惠帝三年）以来，至 1883 年（清光绪九年），共有 66 次。其中自 1371 年以来，明朝记载了 15 次，清朝 34 次，明清以前只记载了 15 次。历史愈久，记载愈少，因此这些记载肯定是不完全的，特别是当雨粟落在穷乡僻壤，就更加没有记载的可能。从记载中看出，雨粟颗粒大小，变化很大，大如豆粒，小似芝麻，最大如掌。颜色各不相同，以红、黑为主，五色相间。有的坚如铁，通心皆黑，有的有孔中通，有的呈黄泥丸子，中有硫磺气。从雨粟记载的特性看，它们很可能是火山喷出的细粒碎屑物。

在火山喷出的过程中，所抛出的火山碎屑物的数量十分惊人。有的不具固定的形态，有的呈现一定的形状。不具固定形态的碎屑喷出物，可以根据其大小粗细分为三类：大于鸡蛋（或 >32 毫米）的可称作火山岩块，它们因为颗粒粗，抛不远，一般只留在火山附近；小于鸡蛋并大于黄豆（4 ~ 32 毫米）的，叫做火山砾；如果小于黄豆（即小于 4 毫米）就是火山灰，俗称雨粟或雨豆。因为它们颗粒小，重量

轻，可以随风漂流到天涯海角。因此，中国大陆发现的雨粟就不一定是大陆本身的火山喷发的产物，很可能是大陆邻近的火山区（如日本、菲律宾或印度尼西亚）的火山活动喷出的火山灰被气流带过来的。如印度尼西亚的爪哇岛和苏门答腊岛之间的喀拉喀托火山，1883 年发生了大爆炸。整个火山锥有一半都被炸飞了，所喷出的火山碎屑物体积为18 立方千米，火山灰洒遍全球南北纬40°之间的地区（图2—1）。当年湖北咸宁的“雨红麦”是否就是从印度尼西亚飞来的火山灰呢？如果是的话，为什么它不落在别处，单落在咸宁，这就完全是受大气环流的控制。

当流动性的岩浆从火山喷出，被抛向空中，并在空中固结，保持原来的流动状态，这种碎屑物可以叫做火山弹。火山弹在空中固结时，可以形成球形、椭圆形、拉长的纺锤形、长条状。许多火山弹由于骤冷，表皮呈致密的玻璃质，内部则多气孔。火山弹是火山口内的岩熔的最表皮被抛向空中而形成的，如果喷发力特别强，岩浆就会被切成许多片段，难以形成火山弹，所以火山弹常常只是出现在火山口附近，如腾冲马鞍山、老龟坡以及山西大同等火山，所发现的火山弹都是在火山口内发现的。如果岩浆被抛向空中，由于重力的作用，未固结的火山弹掉到地面上，相互冲撞，可形成扁平的熔岩饼。火山弹和熔岩

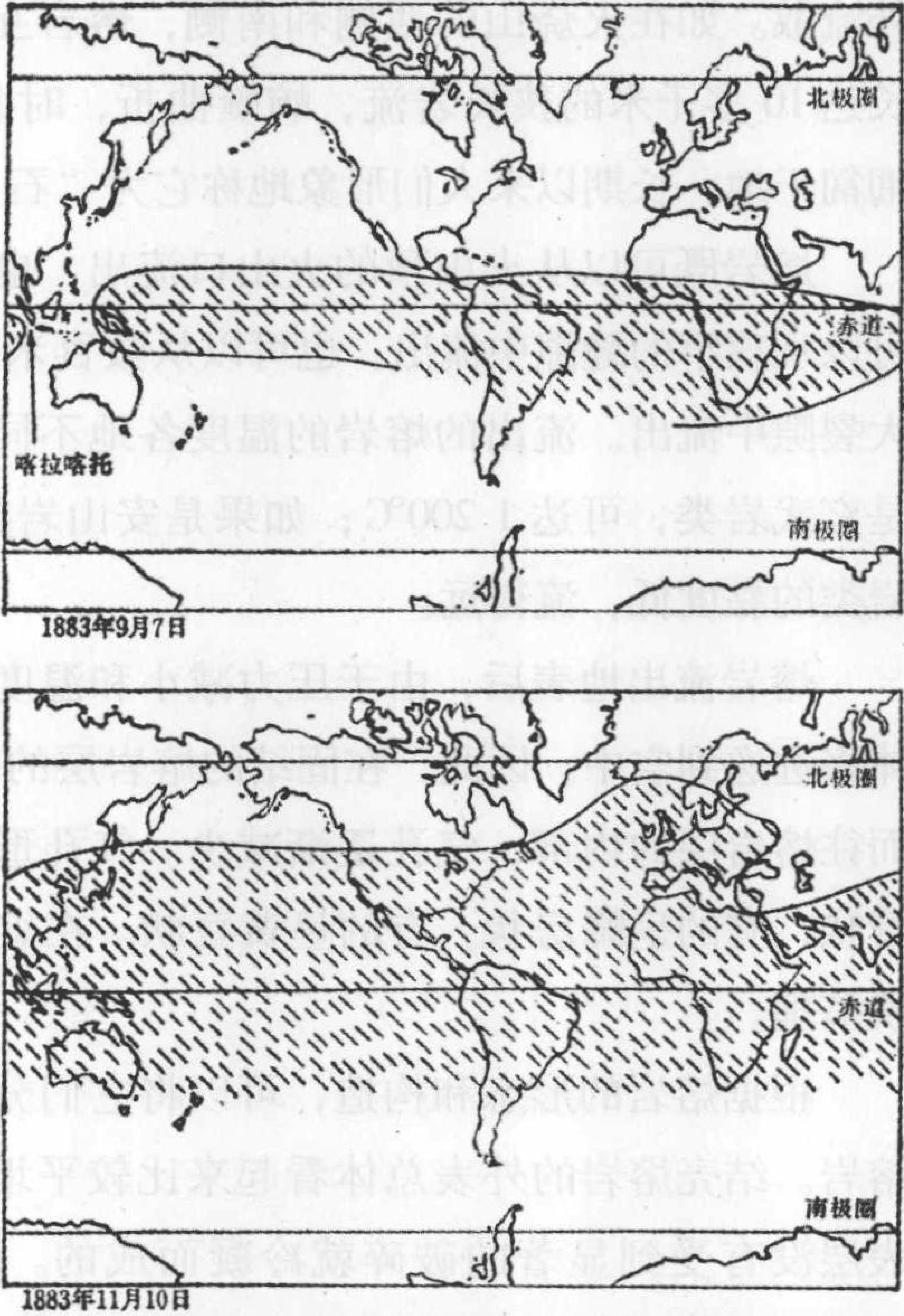


图2—1　1883 年印度尼西亚的喀拉喀托火山喷发时所喷出的火山灰在地球上散布的范围（据 P. Francis，1976）

饼的大小非常悬殊，大者直径达数米，小的略大于豆粒。如果比豆粒还小，就可以叫做火山毛或火山滴。

如果岩浆被抛到空中，有时刚喷出地表，由于压力急剧减小，使得岩浆中的气体大量而迅速地逃逸，在岩石中保留下大量气孔，形成浮石，民间俗语称：蜂窝石、江沫石、水浮石等。《长白征存录》曾有这样的记载：天池“水面有浮石，形如肺，名海肺石。”徐霞客于1639年4月21日游腾冲打鹰山时，曾记录打鹰山顶的浮岩“山顶之石，色赭赤而质轻浮，状如蜂房，如浮沫结成者，虽大至合抱，而二指可携，然其质仍坚，真劫灰之余也”。

火山活动中最普通的产物是熔岩。据统计，世界上的火山一次喷发时喷出的熔岩可达43立方千米。如冰岛一次史前火山就曾喷出过如此多的熔岩。五大连池地区的老黑山和火烧山所流出的熔岩，各自向外流散。如在火烧山的西侧和南侧，熔岩互相叠覆，汇成一片，形成长达10多千米的狭长岩流，蜿蜒曲折，时起时伏，宛如黑色的巨龙，匍匐于地，长期以来人们形象地称它为“石龙岩”。

熔岩既可以从火山顶的火山口流出，也可以从火山侧翼流出；它可以从狭窄的缝隙中流出，也可以从数百米长的乃至20～30千米长的大裂隙中流出。流出的熔岩的温度各地不同，或随岩性而变化，如果是玄武岩类，可达1 200℃；如果是安山岩类，可达950℃。而且玄武岩类的黏度低，流得远。

熔岩流出地表后，由于压力减小和温度降低，在岩浆中含有的气体将逃逸到空中。因此，在固结的熔岩层的表面，可以留下许多气孔，而往熔岩层的内部，气孔逐渐减少。气孔形状各不相同，有的呈长笛管状，有的呈蜂房状，有的呈黄豆状。在熔岩层的下部常有美丽的柱状节理。

根据熔岩的形态和构造，可以将它们分为两种：结壳熔岩和渣块熔岩。结壳熔岩的外表总体看起来比较平坦、光滑，是由于熔岩流的表层没有受到显著的破碎就冷凝而成的。最先冷凝的外壳，一般厚20～30厘米，下部仍保持塑性，因而仍可发生塑性变形。在变形时，表壳受到推挤、拖拉、扭动或膨胀，因而遗留下奇形怪状的外形，反

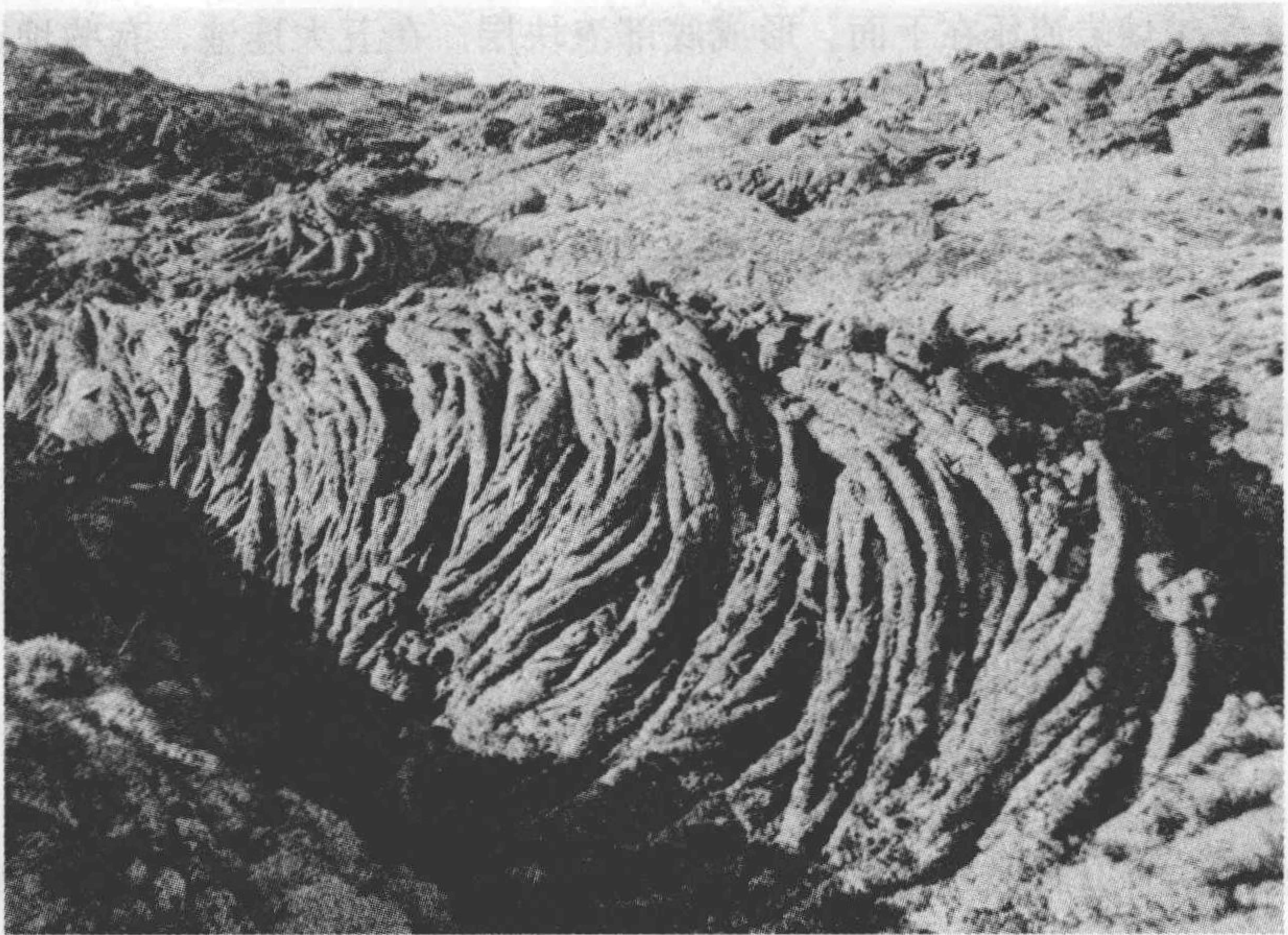


图2—2　五大连池的绳状熔岩（中国地质博物馆，1979）

映出不同流动状态的表壳结构。其中，最引人注目的是绳状熔岩（图2—2）。绳束的直径达30～60厘米，单绳直径为5～8厘米。其次是波状熔岩，其波高可达20～100厘米；另外，尚有各种各样的平行褶皱构造。渣块熔岩的表面极为粗糙，它好像是由带刺的焦炭状碎片所组成。五大连池老黑山的渣块熔岩被当地人称为翻花石，其表面坎坷不平，远远望去，好像杂乱无章的石海（图2—3）。熔岩流在向前蠕动过程中，先固结的表层发生破裂而形成碎块，在下伏未固结熔岩的驮载下继续流动，再次破碎、翻滚、黏结，形成了翻花熔岩。流动着的翻花熔岩的前锋，由于地面的摩擦而受阻，下部流速慢，上部流速快，前锋上部的渣块向下垮

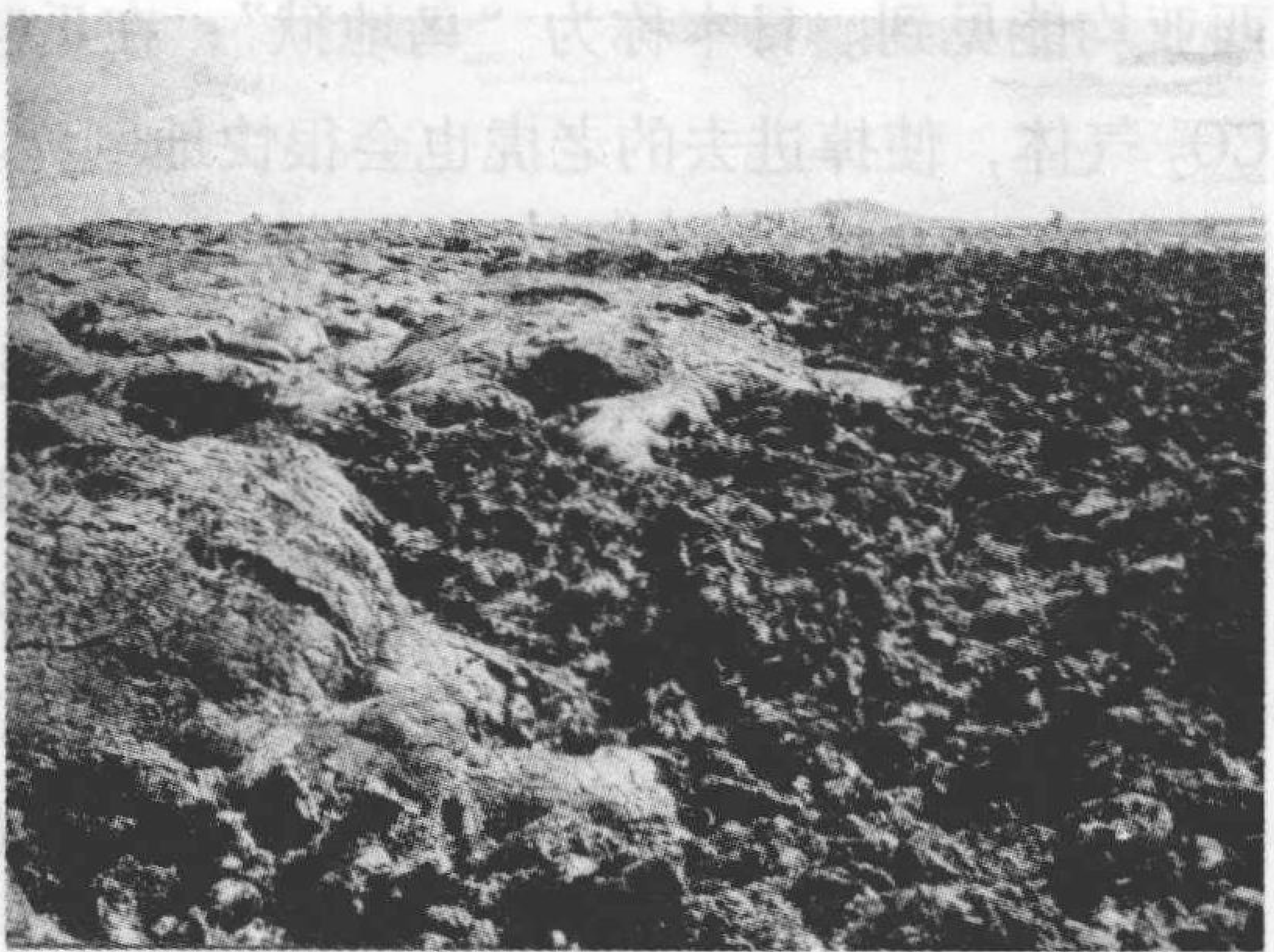


图2—3　五大连池的翻花熔岩（中国地质博物馆，1979）

落，又被熔岩流压在下面，形成底部渣块层。在五大连池，有些地区底部渣块层厚20厘米，中部块状熔岩层厚70厘米，上部渣块层厚40～70厘米。如果人们想在渣块熔岩上行走，将会极度困难。

火山喷发时除了喷出熔岩和火山碎屑物等固体物质外，还喷出大量的气体。看那高耸入云的"蘑菇状"火山烟云，大都是气体组成。而喷出的熔岩中有着大量的气孔，也表明它们在喷出时有大量气体存在。有人注意到在1938年苏联的克留契夫火山喷发时，每喷出一立方米固体物质，就喷出75～1 000立方米的气体。固体与气体的比例可达1∶500，气体之中一半是水蒸气。

有人研究过世界上七座大火山喷发时喷出的气体，它们是1926年喷发的夏威夷冒钠罗亚火山、1959年喷发的非洲尼拉贡戈火山、1964～1967年间喷发的冰岛肖尔特谢火山、1902年喷发的马梯尼岛蒙彼列火山、1915年喷发的美国拉辛皮克火山、1929年喷发的尼瓦弗岛火山和1955年喷发的日本雾岛火山。在喷出的气体中，所含水分的体积比为43%～94%，平均为73%；其次是CO_2，体积比为2%～46%，平均为20%；其余7%为SO_2、H_2S、CO、H_2和N_2。氢气和硫磺是可燃物质，它们会使喷出到地表的熔岩温度升高。而CO_2、SO_2和CO都是能令人窒息的气体。在一些火山活动晚期的低温放气现象中，CO_2最为常见，它们可以在一些低洼地方汇聚起来，鸟儿飞到那里就会窒息死亡。腾冲地区的扯雀塘就是一个例子。在新西兰、日本和印度尼西亚均能见到。日本称为"鸟地狱"；在爪哇，一个死火山口内浓烈的CO_2气体，使掉进去的老虎也会很快地倒毙。

火山喷出物中的水来自何处呢？有人认为是岩浆从好几千米深的含水层中捕获来的；有人主张是原生的岩浆水。总之，这还是一个有争议的问题。有人计算过，地球存在45亿年来，火山抛出的固体物质总量为全部岩石圈的一半，火山抛出的水为现代全球大洋水的一半，另一半水则是从深部岩浆释放出来的。有人用实验证明，15千巴压力、约1 000℃的岩浆可溶解30%的水；压力降低时，水分发生分离，岩浆发生沸腾。

岩浆中所含有的水和其他气体，当它们从地球内喷到地表后，都

逃逸到了空中，剩下来的则是火山喷出的硅酸盐矿物构成的火山岩。

二 熔岩洞穴

洞穴是游人、学士吟诗、赋文、题字和游玩的佳地，也是寻常百姓在战乱之年躲避兵荒马乱之场所。一提起洞穴，就使人想起范成大的《桂海虞衡志》："余尝评桂山之奇，宜为天下第一，……山皆中空，故峰下多佳洞。"在洞穴中最著者为桂林的七星岩和1962年重新发现的芦笛岩。如在七星岩中，800米的游程，岩道曲畅勾连，清幽深邃，石钟乳、石笋、石幔和石花比比皆是，真是瑰丽多姿，琳琅满目，俨如神仙洞府。然而这些知名的洞穴皆为岩溶洞穴，是由地下水长期溶蚀可溶性的石灰岩而形成的。在自然界还有另一种洞穴，它没有岩溶洞穴那样美丽与宏大，但也玲珑剔透，蔚为奇观，这就是火山区中的岩溶洞穴，或称岩溶暗道。当你攀登一座火山之时，你用脚蹬一蹬所踏着的大地，有时就会传来"铿铿"之声。这时你会感到惊奇，原来在这怪石嶙峋的石山之下是空的！它们就是火山岩的洞穴——熔岩暗道。

笔者曾经亲临腾冲老龟坡火山西坡的景福洞和蝙蝠洞。当地老乡说，洞中的蝙蝠像老鹰那么大。我带着探奇的心情下到洞里，在火山锥缓缓倾斜的边坡上寻找洞口。原来，洞口在乱石丛中，极不显眼，它有5~8米深，好像竖井一样，只能容一人缓缓爬下。由洞口下去，洞向西倾，开始数十米是南北走向，然后折向东。洞穴全长150米，最宽处5.3米，最高处2.9米，横断面呈拱桥形。中国人民解放军某部在进行水文地质普查时，测量并绘制了该洞的平面图与剖面图（图2—4）。在洞的另一端，也有一个竖井状出口。洞底有纵向的沟槽和垄脊，相间排列，脊高不及半米，宽小于1米，长约12米。交错顺列，形似蛇、龙。顶部及两壁，有的地方较平坦光滑，有的地方挂满下垂的熔岩钟乳，它虽不及溶岩洞穴的钟乳那样五彩缤纷、如花似锦、琳琅满目，但也令人赞叹，其形有如手指，有如棘刺，又有如刀刃。特别是壁上的纹饰，颇为精致。人行洞中，如不小心，极易碰伤。更令

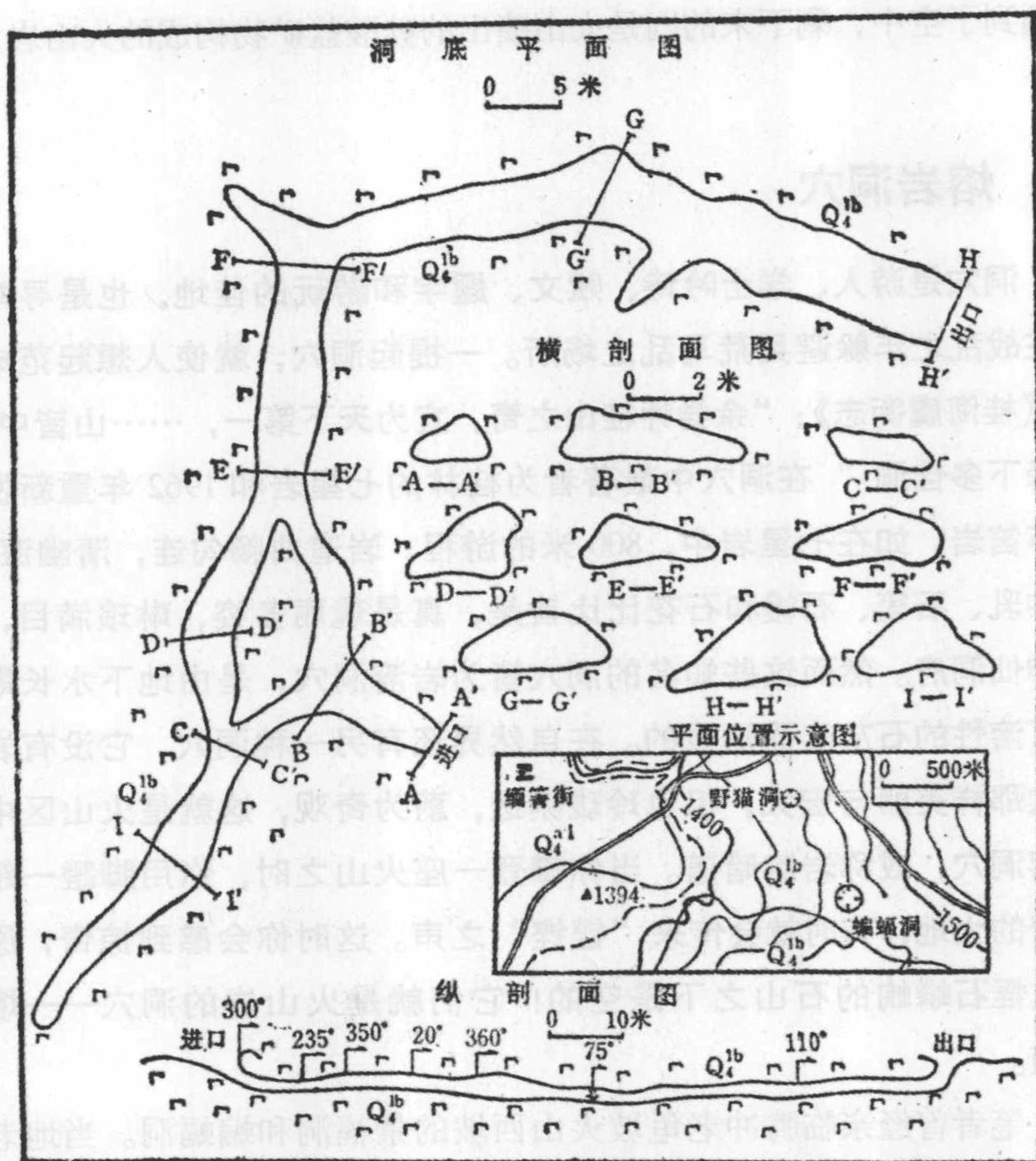


图 2—4 腾冲县老龟坡火山熔岩洞穴之一蝙蝠洞的实测平面、剖面图（据腾冲水文地质报告）

人惊叹的还是洞中的蝙蝠，当时适值隆冬，蝙蝠已进入冬眠时期，它们在洞中藏身何处？只见暗道顶壁黑压压的一片，由于手电暗淡，乍一看不知何物，模糊不清。但是，当人们咳嗽一声，洞顶黑物就扑扑颤动，甚至展开两支宽大的翼手，原来是一只只蝙蝠在洞顶倒挂金钩。虽然未见老鹰大者，但究竟有多少，确如恒河沙数，难以数清。像这样的熔岩洞穴不仅腾冲有，在五大连池也有，在长白山的白头山也有。

那么，这些熔岩洞穴是怎样形成的呢？当岩浆喷出到地表后，熔岩流的表层受冷凝固形成表壳。固结的岩石其导热性极差，因此，熔岩内部仍然保持高温，呈熔融状态，形成潜流，并逐渐集中于一些壳下的通道之中，形成熔岩暗道。当暗道中的熔岩流空之后，就留下了

空洞。如果空洞顶壁的熔岩仍然保持一定的塑性，在重力作用下则形成熔岩钟乳。熔岩的潜流流向何处？因为表壳冷凝之后，常常形成裂隙，暗道的熔岩潜流就会顺着裂隙上冒或冲破表壳上涌，形成二次熔岩流，因而出现了各种各样的溢流构造（如具有喇叭口状的环状熔岩饼）。如果伴随着气体发生爆炸，则形成喷气穴。当多层熔岩饼重叠起来，则形成塔状而中空的喷气叠锥。它们常成群出现，并依熔岩流流动的方向排列成行。如果熔岩潜流没有流出地表，而是把熔岩表面凝固的表壳向上拱起，又形成瘤状穹丘。

熔岩洞穴和具有大量气孔与裂隙的火山岩，具有强烈的渗透性和汇水能力。它们接受大气水的补给，并向下渗入补给地下水，有时熔岩洞穴本身就可能成为地下水潜流的重要通道。在火山岩区的一些空洞，洼坑处吸水能力特别强，如腾冲和顺乡西南大盈江边的马鞍山安山玄武岩中就有十余个大的消水洞，当地群众称为瞎马洞和吸水洞。1979 年 12 月 15 日曾测得其中一个洞的消水量为 18 升/秒以上。下渗的地下水主要集中于宽大的管道和洞穴系统中，形成巨大的地下径流。然后，在下游从火山岩区的沟谷底部排出地表，形成巨泉。如腾冲的坝派巨泉，在大盈江西岸的熔岩台地的陡坎下呈泉群溢出，在南北长约 150 米的范围内，有三大泉群出露。它们可分为 15 个小出水口，汇聚后的总流量达到 3 910 升/秒。当泉水从玄武岩中涌溢而出时，响声雷动，气势磅礴，清澈的泉水汇入浑浊的大盈江，一清一浊，“泾渭分明”。坝派巨泉的水温高达 21℃，高于当地年均温 7℃，可算着微温温泉。由于小气候的影响，泉水周围植物繁茂，生机勃勃，芭蕉早熟，当地的傣族人民已利用巨泉的微温水试种双季水稻获得成功。

三　奇特的山形

火山以它特有的形态而引人注目。的确，火山不像桂林之山那样玲珑剔透，不像巴蜀之山那样参差多姿，不像河北之山那样绵衍盘桓，不像江南之山那样峻峭巧丽，更不像莽莽昆仑那样崇高浑厚。火山，以它特有的截头圆锥状的山形，直冲霄汉，给人以尖锐而威武之感，

正在喷溢的火山更使人领略到大自然创造与破坏的神力。这种截头圆锥状的火山往往不是由一次喷发就能形成的，而是各种类型的喷发反复作用的结果。火山有哪些常见的类型呢？一般如图 2—5 所示。

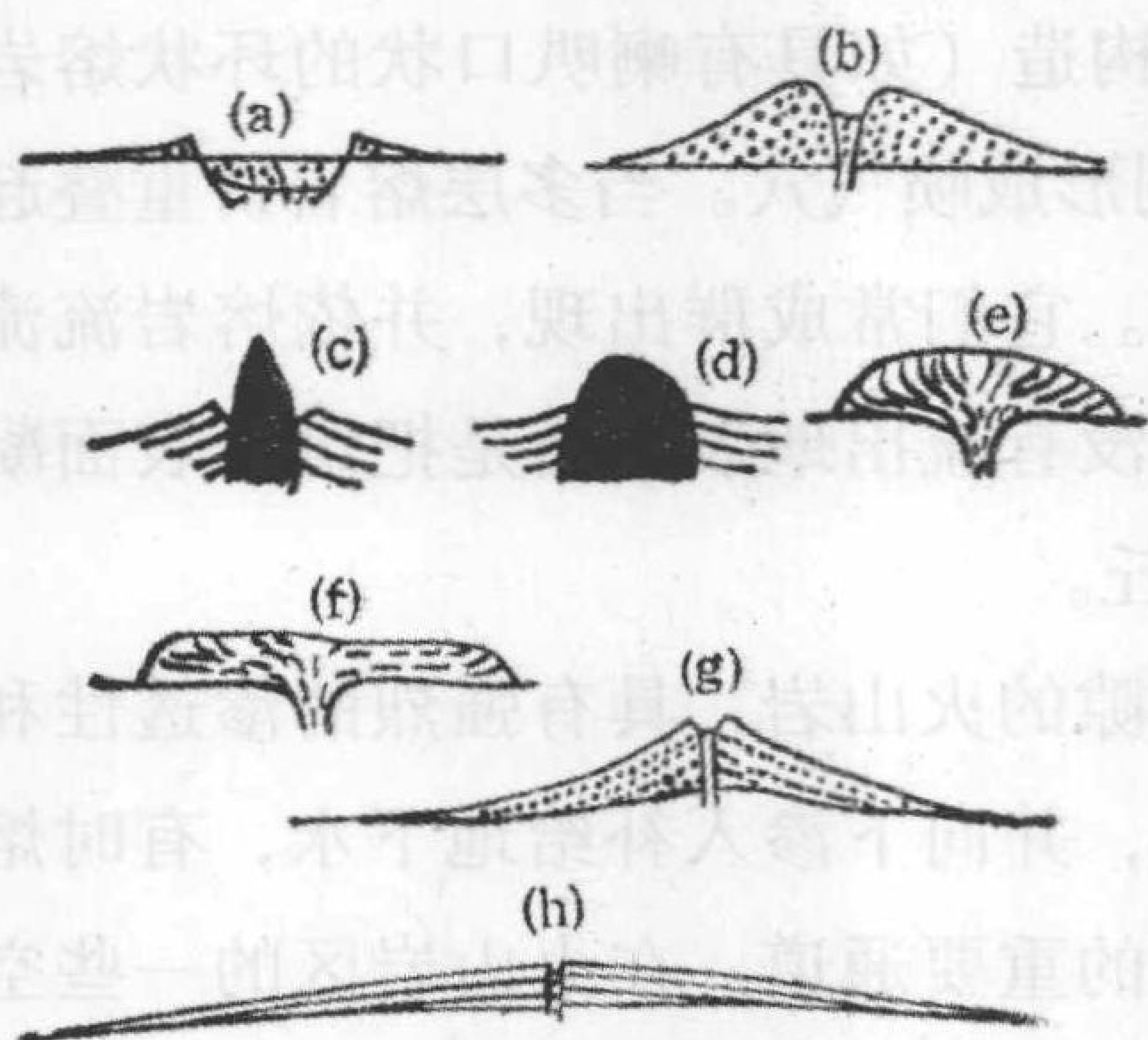


图 2—5　各类型火山的形态和构造

(a) 小火口；(b) 集块火山锥；(c) 火山柱；(d)、(e)、(f) 熔岩穹丘；(g) 成层火山；(h) 盾形火山

当火山喷发时，若只喷出大量碎屑物，在火山口周围堆积成圆锥丘，在顶部还形成一个大的火口，它们就叫做集块火山锥。它们可以完全由浮岩组成，也可以由火山渣堆积而成。吉林省龙岗火山群中许多小火山锥就是火山渣锥。

我们在许多书籍中常常见到的许多截头圆锥状火山多是一种成层火山，它们是由熔岩和火山碎屑物不断流出和喷发时，相互积累的火山体。它们顶部有火口，构成这些火山的岩石主要是铁镁质和中性火山岩。腾冲县晚更新世以来形成的火山锥，如打鹰山、黑空山、马鞍山和大空山等就属于这类火山。

当喷出的熔岩黏性极大时，它一般不向四处扩散，而突出在火山口的上面，形成穹丘状火山丘，叫做熔岩穹丘。组成穹丘的熔岩可以明显地分层，在穹丘底部，层面向山体中心倾斜，越接近山顶，倾斜度越大。腾冲县来凤山北部是一个由早更新世喷出的中酸性英安岩形成的穹丘，熔岩的层理和由角闪石组成的流线均极清楚，它们向着火山体的中心倾斜，穹丘的南半部被晚更新世的安山玄武岩覆盖。

如果喷出的熔岩是黏度很低的玄武岩，它们可能静静地从喷口往外流，没有因喷发活动而形成的火山碎屑物（或极少），形成非常平缓的倾斜山体。在山顶也可见到火山口，也可以没有火山口。其基底的直径可比高度大得多。没有明显的截头圆锥形，而像一个平摆在地上的古代武士的盾牌，一般称它为盾形火山。最著名的盾形火山见于夏威夷岛，其中一个火山基部的直径达 100 多千米，而高仅有 4 000 米，

坡度也只有4°～6°。又如腾冲有四个火山就是小规模的盾形火山，像腾冲城北的马耳山、热海热田东部的朱星街东大坡头火山等。在陈家巷的一个断面上就可以看到马耳山火山喷出的厚层状玄武岩层直接覆于早更新世的英安岩层之上。英安岩顶部有薄层的烘烤层，玄武岩下部少气孔，而往上增多。

当熔岩从地壳上的巨大断裂或裂隙群静静地流出时，没有爆炸，而是像洪水般向四面八方溢流，从而能形成平坦的熔岩高原。有时，一个熔岩高原不是从一个狭长的裂口流出而形成的，而是由一个个盾状火山所组成的集合体。长白山一带的盖马高原就是一个在60～300万年前早更新世形成的熔岩高原，方圆约1 480平方千米。此熔岩的溢出可分为三期，而高原的主体则是由第二期玄武岩形成的。在中心部位有许多呈东北—西南向盾形火山群，其中心位置就是白头山。玄武熔岩流在中心部分可分出12～13层，总厚达150米，在高原边缘也可见到1～2层，厚10～20米。

有的火山高原不是由熔岩组成，而是大量浮石和火山灰喷出后覆盖广大地区而形成的高原，我们称为火山碎屑高原。碎屑物不是从火山口喷出，而是从裂隙喷出。在这种高原内部常常出现破火山口。在新西兰的陶波火山带就出现了流纹岩高原，由浮岩和熔结凝灰岩组成，其面积达26 000平方千米，喷出物厚度达18.3～152.5米。

不要认为所有的火山都能形成正地形，有的火山喷出结果是在地面留下各样的深坑。

如果岩浆中的气体离开岩浆囊上逸时，加热了下渗的地下水，产生水蒸气。当压力足够大时，水蒸气发生爆炸，冲翻地壳表层，形成圆圆的小火口，但没有小丘，小火口内可积水成湖。腾冲县的顺江街附近的龙潭就像是小火口。

另一种负地形叫破火山口，或破火口。它是在火山体或火山喷发中心上形成的大型的凹陷。它常常是一种近于圆形的深洼地。它的周边常为陡壁，但直径要比火山顶上的火山口大得多，可达2～25千米，而一般火山口最大的也不超过1千米。破火口可能是由于山体的爆炸而形成，这种成因的破火口规模不大。破火口的主要成因是由于塌陷

作用，如火山体下面的岩浆囊中的熔浆全部喷空之后，承受不了上覆地层的负荷，而发生塌陷。破火口也可能是由火山口的侵蚀而逐渐扩大形成的。我国长白山火山的白头山顶上的天池可能就是一个塌陷而成的破火口。整个天池略成椭圆形，南北径长 4 850 米，东西径宽 3 350米，积水面积为 21.41 平方千米，分水岭周长 18.11 千米。湖面海拔为 2 155 米，湖水最大深度为 312.7 米，平均水深为 204 米。白头山火山锥主体大约是在 20 万年前中更新世末的粗面岩类喷发堆积在高原玄武岩之上形成的。在白头山顶，于中更新统白头山组的粗面岩之上覆以灰白色和黄色粗面质浮岩，在白云峰顶厚达 40 米，称白云峰组。其中曾经夹有炭化的树木，用^{14}C 法测得的年龄为 1153 ±90 年，即相当于中唐时代喷出的，或许白头山天池就是由于这次大量浮岩质火山碎屑物从火山口喷出后，堆积在火山口周围，随着浮岩物质的大量喷出，白头山火山体内所含的挥发物质大量散失，使得火山颈内被掏空，因而承受不了火山顶及其周围的岩石，在锥体的中心部分发生塌陷，形成了现在的破火口。图 2—6 是 1908 年所测制的白头山天池的地

图 2—6　1908 年测制的白头山天池图（据《长白征存录》）

图，这可能是我国最早的一幅火山口地图了。在广东省湛江市，有一湖光岩，其面积3.6平方千米，水深20米，湖面近于圆形，它到底是一个火口湖呢，还是一个破火口？因缺乏足够的地质资料而难下结论。

上述各种火山复合出现，则形成构造复杂的火山体称复合火山。如果在同一火山口上长期喷发，就可形成形态较简单的圆锥形火山。如果喷发中心发生迁移，火山顶上的地形就复杂起来。有时在火山的侧面常有小的火山体，称为寄生火山锥。腾冲晚更新世的许多火山都有寄生火山锥。日本现在的富士山，其基底是小御丘火山，然后喷发形成古富士山，最后喷发才形成现在的富士山。在现在的富士山上有60个寄生火山锥。

在一定的范围内，有时存在着几个在构造、大小、岩性上相类似的火山体群称为火山群。如黑龙江省五大连池火山群，火山岩分布面积达600平方千米，东西最长36千米，南北最宽25千米，共有14座火山锥，由北东及北西向两组断裂控制其分布，排列非常整齐，岩石类型为含白榴石的碱性火山岩。又如在山西省大同市东聚乐堡，于晚更新世（10万年~20万年前）喷出的大同火山群共有20座火山锥，分布面积约50平方千米，喷出的熔岩为碱性玄武岩。

当火山群的面积更进一步扩大，则可以形成火山区或火山带。如腾冲上新世以来的火山，所占面积达1 000平方千米，它可以按时代与岩性分为许多火山群，如上新世—早更新世的腾冲东部火山群，腾冲北部马站一带中更新世火山群等。

上面各种类型的火山，如果按照喷出的形式，可以分为中心式喷发和裂隙式喷发。中心式喷发中最典型的是成层火山，而裂隙式喷发最典型的类型是熔岩高原。介于两者之间的过渡类型是盾状火山。如夏威夷的盾状火山，在喷发时从火山中心向三或四个方向产生放射状裂隙，山体就是从这些裂隙和中心火口流出的大量熔岩形成的，因此火山体往往不是圆锥状。

成层火山等火山锥之所以能够存在，主要是由于火山体中常常存在许多岩墙和岩脉系统，它们成为火山锥的骨架。但是，火山从它活动的第一天起，就开始受到侵蚀。由于连续不断的侵蚀作用，火山体

的原始面貌就会受到破坏，最初在山麓平原形成浅谷，然后逐渐向上伸展，剥蚀成几个由山顶呈放射状的浅谷，并且谷的深度和宽度加大。火山口成了各个谷的源头。到后来，火山口的位置也不清了。这时，火山体的内部构造就会暴露出来，可以见到旧火山口下部的侵入岩体和放射状岩脉，或环状岩墙与锥状岩脉。到了最后，火山锥体就会因强烈的侵蚀作用而最终消失掉。

第三章

从地下喷出的岩石

我们所见到的火山都是由火山岩堆成的。这些蓝色、紫色或黑色的石头，都是地下的岩浆喷出到地表后的残留物。而岩浆中的气体，当岩浆喷到地表后，都逃到宇宙空间去了。因此，所谓火山岩，就是从地下深处喷出到地表的岩浆，在地表或近地表处固结而形成的岩石。从地下岩浆变成地表的火山岩要经过许多过程，经历极其复杂的变化。能产生火山岩的原始岩浆是在上地幔中局部熔融而形成的，其成分接近于玄武岩。但是除了大洋岛屿外，很少能见到与初始岩浆的成分十分接近的火山岩。这是因为大陆和大洋的结构不一样，一般认为大陆地壳具双层结构，下部为硅镁层，上部为硅铝层，而在大洋地区则缺失硅铝层。在大洋岛区，当初始岩浆上升时，只要穿过薄薄的硅镁层就能直接喷出到地表。在大陆上，地壳的厚度很大，岩浆从上地幔上升到地表，必须经过比较厚的硅铝层。而硅铝层的温度比较低，上升的高温岩浆与低温的硅铝层的岩石相接触时，岩浆的温度会降低，岩浆本身会因冷却而结晶。有时还会将硅铝层的物质捕俘到岩浆中去，并在岩浆中熔化，改变了岩浆的成分，这种作用叫同化作用。这时，喷出到地表的岩浆，其成分与初始岩浆就有了很大的差别。但是，有的时候，有的地方初始岩浆不一定是玄武岩浆，如环太平洋火环，即出现一个巨大的安山岩带。安山岩浆是由下降板片的摩擦熔融而形成的，因此，有人认为它们的初始岩浆是安山岩浆。

各种初始岩浆从地下深处向地表迁移时，并不是所有的岩浆都能到达地表，有的在地下深处、有的在不太深的地方停了下来，形成岩浆库或称岩浆囊。它们时而向地表提供岩浆，如果因为温度降低而凝固，它们就成为侵入体。由于岩浆的成分不同，就可形成各种各样的侵入体。如花岗岩、闪长岩和辉长岩，等等。喷出到地表而形成的火山岩也是极其复杂的，有的是黑色的玄武岩、有的是深灰色的安山岩、有的却是肉红色的流纹岩。就是这些淡色的流纹岩，由于岩浆喷出时种种条件的差别，也可以出现许多奇形怪状的岩石。如有的是极细密

的像玻璃一样的黑曜岩，我们的祖先常常拿它来做石器；有的是形似珍珠的集合体，可层层剥离，叫做珍珠岩；有的形如松脂，叫做松脂岩。其实它们就成分而言都是流纹岩。当你在自然界中看着各种各样的岩石，就好像进了迷宫一样。

火山岩和侵入岩虽然都是岩浆的产物，但是由于侵入岩是岩浆在地下深处经历了长期缓慢地散热，岩浆才慢慢冷却下来，因此，内部的组分可以按一定次序结晶，并按一定次序排列组合起来。因此，侵入岩中的矿物有比较粗大的晶体，而且整个岩体都被囚于地壳内部，所以不是层状的。它们经过长期的剥蚀，可以出露在地表，并且在地表常常表现为明显的环形构造，在卫星影像上比较容易识别。

岩浆喷出到地表，如果是多次喷发，各次喷出的火山岩就层层叠叠起来，形成明显的层状构造。特别是年代久远的火山岩，火山锥体已经被侵蚀掉，这些火山岩层就与成层分布的沉积岩很难区别。沉积岩的种类很多，一般在水盆地中经过化学作用和生物作用形成的石灰岩或白云岩是较容易识别的。而一些由细粒碎屑物形成的沉积岩与火山岩层在一起时，就常常使人混淆不清，难以辨认，这时只有靠显微镜才能辨别出来。

火山岩因为是岩浆喷出地表后快速冷却而形成的，因此，它有一定的特点。通常，它是由斑点状分散的晶体和包围斑点状晶体的基质部分组成的。这些斑点状晶体一般只有 0.5 毫米大小，即还没有芝麻粒大，在岩石学上把它们称为斑晶，它是岩浆喷出地表以前，在深部压力很高、而且含有大量挥发性气体的条件下缓慢结晶析出的。包围斑晶的基质是微细的晶体的集合体，或完全是玻璃质，难以用肉眼识别。它们是岩浆喷出地表后，在一个大气压力条件下，大部分挥发物都跑掉了，因为突然冷却急速结晶形成的，或根本就来不及结晶，所以基质的成分是代表岩浆中原来液体的成分。如果详细研究斑晶矿物，就可以了解岩浆在岩浆库中缓慢进行的结晶作用；如果对基质的化学成分进行研究，就可以知道不同时期残余岩浆的成分（图3—1）。根据火山岩中既有斑晶又有基质的特点，很容易把它们与其他岩石区别开来。

从显微镜下的研究可以知道，岩石是由许多细粒的矿物构成的。在自然界中，矿物有 2 000 多种，按其成分，有的是硅酸盐、有的是氧化物、有的是硫化物，还有卤化物、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等。并不是所有的矿物都能在岩石中见得到，造成岩石的矿物有一百种左右，岩石学家把它们称为造岩矿物。其中，最常见的就是下列几种：橄榄石类、石榴子石类、辉石类、角闪石类、云母类、石英类、长石类、似长石类、尖晶石类、钛铁矿和磷灰石。上述各类造岩矿物中前八类都是含硅的，而且每一类又可以根据所含阳离子的不同分为许多种。如辉石类可以分为镁辉石、镁钙辉石等，长石类可分为钙长石、钾长石和钠长石。而钙长石又可以与钠长石以不同比例混合组成各种斜长石。

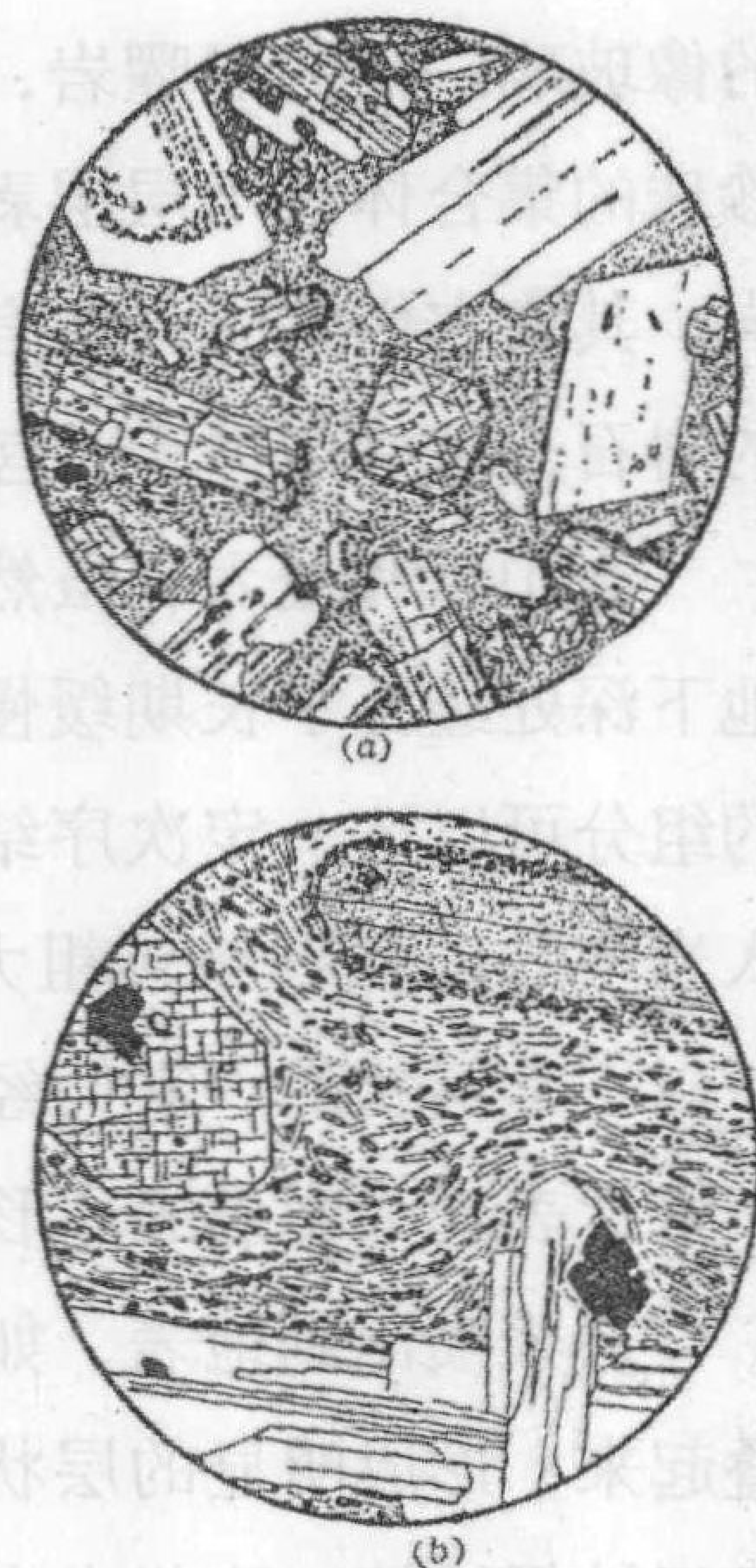


图 3—1　显微镜下的火山岩

(a) 硕辉安山岩：斑状结构，斑晶为环带状斜长石和硕火辉石，基质为半晶质。(b) 角闪辉石安山岩：斑状结构，斑晶为普通辉石、玄武闪石、基性斜长石，其中玄武闪石边部被细粒磁铁矿和普通辉石混合物所包围，基质具安山结构，由微晶状斜长石、普通辉石和火山玻璃等组成。

在火成岩中，并不是各类造岩矿物都能在一种岩石中同时出现，而往往是一种岩石含有这一类矿物而不含另一类。因为岩浆在结晶过程中，有一定规律，常常是先结晶某些矿物，后结晶某些矿物，岩石学家把这种现象称为结晶分异作用。

上述主要的造岩矿物，根据它们的颜色可以分为暗色矿物和淡色矿物，它们在岩浆结晶过程中表现的特性很不一样。当暗色矿物结晶时，常有下列结晶次序：橄榄石→辉石→角闪石→黑云母→白云母，但是这些矿物不是渐变的，往往是先结晶的矿物又与残余岩浆发生作用生成新矿物。淡色矿物的结晶次序是：倍长石→拉长石→中长石→更长石→钠长石→钾长石。因为长石类是固溶体，结晶是可以渐变的。根据岩浆结晶的顺序，岩浆凝结时先结晶的是橄榄石和倍长石；温度

再下降，晶体与熔浆起作用，生出辉石和拉长石；温度再降低，生成角闪石和更长石。因而也就生成不同类型的岩石。也就是说不同类型的岩浆岩往往含有不同类型的矿物。

由于火山岩中基质占绝对多数，仅靠显微镜下见到的矿物来研究火成岩是不行的，必须对岩石作化学分析。在地球上的化学元素虽然有100多个，但是构成火成岩的主要元素不过9个。即：氧（O）、硅（Si）、铝（Al）、铁（Fe）、钙（Ca）、镁（Mg）、钠（Na）、钾（K）、钛（Ti）等。它们占火成岩成分的99%以上，其重量和体积百分比如表3—1。

表3—1　火成岩化学成分

元素	O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Ti
重量%	46.41	27.58	8.08	5.08	3.61	2.09	2.83	2.56	0.72
体积%	91.77	0.80	0.76	0.86	1.48	0.56	1.60	2.14	0.22

在岩浆冷却过程中，上列各元素互相化合，造成各类造岩矿物的晶体。其中大多数是与氧化合，形成各种各样的氧化物，并以氧化硅居多，因此，造岩矿物中大部分都是硅酸盐矿物。

岩石学家在研究岩石时常常对岩石进行化学分析，而分析的结果又是以各种氧化物来表示的，其中主要的氧化物是：SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、FeO、MgO、CaO、Na_2O、K_2O、TiO_2、H_2O和MnO。上述氧化物中以SiO_2的含量最多，变化也最大，最少含量可达35%，最大含量为78%，有时甚至可达90%。由于SiO_2含量的不同，岩石类型也就不同。有人根据火成岩中SiO_2的频率统计分析发现，SiO_2的分布有两个高峰，一是在52.5%处，一是在73%处。这就是说在这两处的火成岩最多，与52.5%相当的岩石是玄武岩，与73%相当的岩石是花岗岩。前者是火山喷出岩，后者是侵入岩。

火成岩中的氧化物含量不是随意变更的，常常有一定的规律。如SiO_2含量高时CaO和MgO的含量相对减少，而K_2O和Na_2O的含量却很高；相反，当SiO_2含量少时，CaO和MgO的含量增高，而K_2O和Na_2O的量反而减少。由于有这样的规律，岩石学家常常利用上面所分析的氧化物值，画出各种各样的图表，以研究和确定火山岩的类型、

系列和组合等。其中最简便的是用 SiO_2 和 Na_2O+K_2O 重量百分比作直角坐标图（图3—2）。图上的实线是火山岩名称分界线，斜线为组合指数 $[\delta=(K_2O+Na_2O)^2/SiO_2-43]$，根据实线和斜线可以区分出岩石的碱度、系列和岩石组合类型。

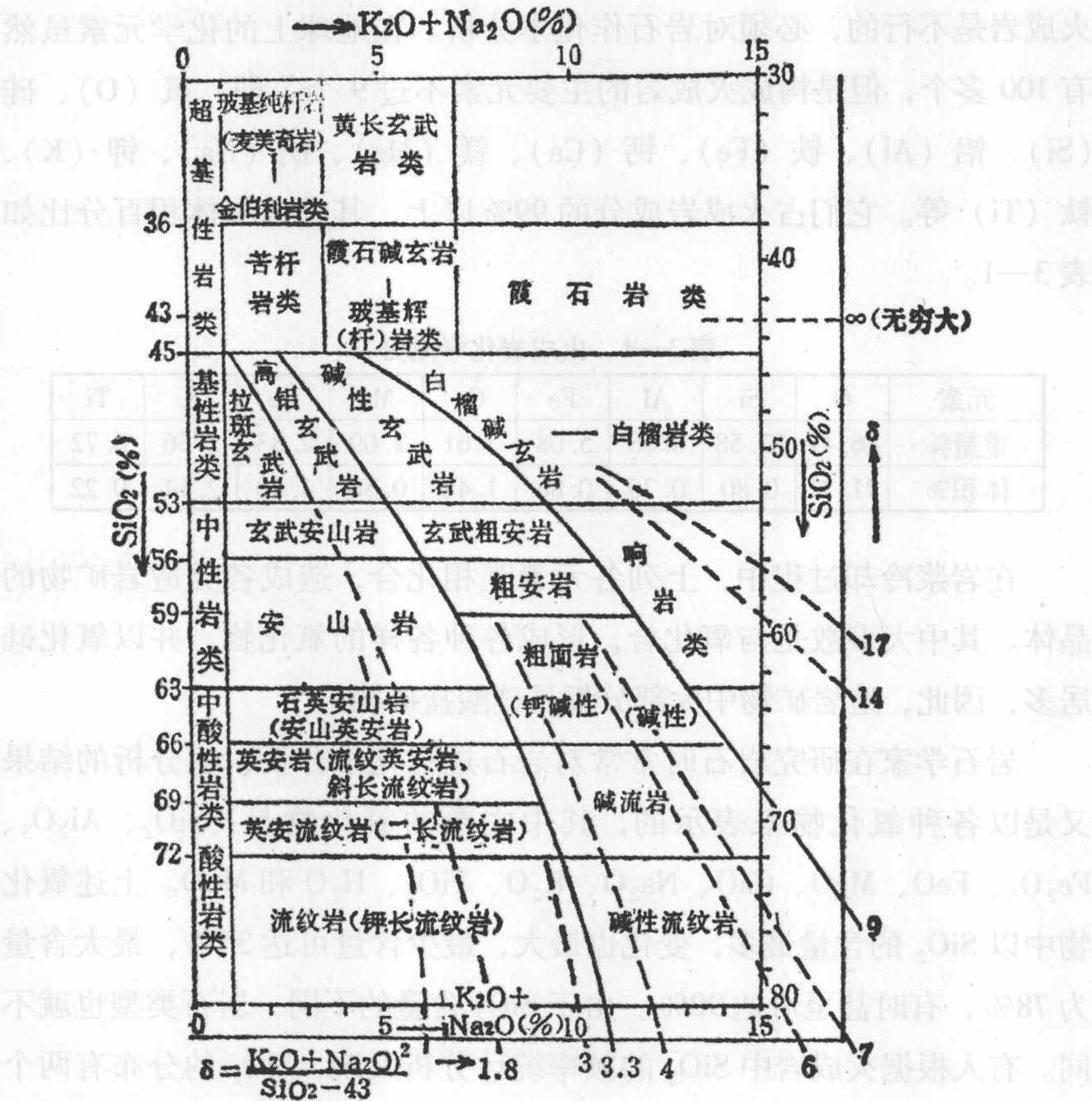


图3—2　用 SiO_2 和 Na_2O+K_2O 重量百分比简便确定火山岩名称、酸度、碱度系列和组合图解（据邱家骧）

从图上可知，$SiO_2<45\%$ 为超基性岩类；在45%～53%为基性岩类（其中含各种玄武岩和白榴岩）；53%～63%为中性岩类（包括安山岩、粗安岩和响岩等）；63%～69%为中酸性岩类（包括英安岩等）；>69%为酸性岩类（包括英安流纹岩和流纹岩以及碱性流纹岩等）。而组合指数 $\delta<3.3$ 为广义的碱钙性岩类；<1.8为钙性岩类（属拉斑玄

武岩系列)；1.8～3.3 者为钙碱性岩类（属高铝玄武岩系列)；组合指数 δ＞3.3 的广义的为碱性岩，属碱性玄武岩系列。因此，一个火山岩只要知道了它的 SiO_2 和 Na_2O+K_2O 的含量，就可以很方便地确定它的名称、酸度、组合指数、碱度、玄武岩系列以及可能共生组合的岩石等。如一种岩石的 SiO_2 为 59%，Na_2O+K_2O 为 5%，投影在图上，可知其岩石名称为安山岩，酸度属中性岩类，组合指数为 2 左右，碱度上属钙碱性岩，高铝玄武岩系列，可能共生的岩石为高铝玄武岩、英安岩、流纹岩等。

近年来，岩石学家们为了研究各种火山岩形成的构造环境，研究了岩石的 Sr、Nd、Pb 的同位素，并分析了许多微量元素，方法是花样翻新，层出不穷。但是最基本的还是上面的图。我们只需要知道这种最最简便的方法就足矣。

第四章

中国的火山

一　新生代以前的火山

在新生代以前远古的地质时代，中国的火山活动相当发育，为了叙述方便，读者有必要熟悉地球的地质历史（表 4—1）。

表 4—1　地质年代表

地质年代			距今年数（百万年）	地壳运动	生物群主要特征		考古分期
代	纪	世			植物	动物	
新生代	第四纪（Q）	全新世（Q4）	0~0.01	喜马拉雅运动	被子植物繁荣	现代人	青铜器 新石器 中石器
		晚更新世（Q3）	0.01~0.126			新人	旧石器时代
		中更新世（Q2）	0.126~0.78			古人	
		早更新世（Q1）	0.78~2.6			猿人	
	新近纪（N）	上新世（N2）	2.6~5.3		被子植物出现	拉玛古猿	
		中新世（N1）	5.3~23.3				
	古近纪（E）	渐新世（E3）	23.3~32			哺乳动物兴盛	
		始新世（E2）	32~56.5				
		古新世（E1）	56.5~65				
中生代	白垩纪（K）		65~137	燕山运动	裸子植物出现	爬行动物兴盛	
	侏罗纪（J）		137~205				
	三叠纪（T）		205~250	印支		两栖动物兴盛	
中生代	二叠纪（P）		250~295	海西运动			
	石炭纪（C）		295~354		陆生植物		
	泥盆纪（D）		354~410			鱼类繁荣	
	志留纪（S）		410~438	加里东运动		无脊椎动物世界	
	奥陶纪（O）		438~490				
	寒武纪（∈）		540~543				
元古代	震旦纪（Z）		543~680	蓟县运动		菌类动物世界	
	南华纪(Nh)		680~800				
	青白口纪(Qb)		800~1000				
	蓟县纪（Jx）		1000~1400				
	长城纪（Ch）		1400~1800				
	滹沱纪（Ht）		1800~2500	吕梁			
太古宇			>2500	五台			

在古老的地质时代中，中国的火山活动可以从各时代的地层中所夹带的喷发物知道。但是，古近纪以前的火山，由于地壳运动的影响，喷出物的一部分，乃至大部分都被剥蚀掉了，所以对当时火山活动的中心，火山锥的原始构造和火山喷出物的分布范围，都难以恢复原貌了。

中国的地质构造非常复杂，它夹持于古老的西伯利亚古陆和南部的冈瓦纳古陆之间。在漫长的地质历史中，各个地区的地壳时而处于活动状态，时而稳定。当处于活动状态时，常伴有火山的喷出。早元古代时，中朝地块的山西、辽东、内蒙古和燕山地区，曾堆积了巨厚的沉积，叫五台群，其中夹有大量的中基性海底喷发的火山岩。

晚元古代时，华北地区是相对稳定的地区，但在发育的早期，燕山地区是相对大的凹陷。在巨厚的碎屑沉积中，常夹有大量喷出的安山岩。与此同时，华南相对比较活动。在湘西的冷家溪群、桂北四堡群中均夹有细碧岩，滇东的大红山群为富钠的含铁火山岩。

早古生代时，中国西部为比较活动的地区，均有强烈的火山活动，如天山的志留纪、祁连山的志留纪、东昆仑的奥陶纪和秦岭的志留纪均有强烈的海底火山活动。上面这些火山活动距今都相当久远，我们不再详述，但值得特别指出的是在中国有两次大规模的火山喷发活动。一次是晚古生代时在西南地区广泛发育的峨眉山玄武岩，一次是在中国大陆东部，中生代的火山活动。

如果你去过四川，当然总盼望去峨眉。峨眉金顶秀的确吸引了无数的游客。当你开始登山之时，你脚下踏着的大地，手中攀附的石头，暗绿暗绿的，它就是2亿多年前喷出的峨眉山玄武岩。其实，它的分布并不仅限于峨眉山，而是广布于川、滇、黔三省，面积达50多万平方千米。它是怎样喷出的呢？地质学家们研究过，当时在川西的安宁河谷一带，是一个基底隆起区，其东面的大凉山和滇东地区，是古生代的一个凹陷，它西边的雅砻江流域也是一强烈的凹陷。在东边的凹陷区，喷出的玄武岩厚达1 400～1 800米，都是在晚二叠世时喷出的。在中间隆起带的东缘，喷出的玄武岩较薄，只有600米。在隆起带的西侧，早二叠世喷出的玄武岩厚度为2 700米。再往西到雅砻江一带，喷出时间更早，从石炭纪起就有玄武岩喷出，可达3 230米厚。可见，当时玄武岩喷出规模是多么大啊！但是，沧海桑田，二亿多年来，由于多次的地壳运动，当时覆盖在西南大地的玄武岩，有的经风霜雨雪、河川冲刷，而被剥蚀掉了；有的由于强烈的地壳运动使它们褶皱成山。今日的峨眉金顶，就是两亿多年前火山喷出的熔岩凝结成为一个巨大

的玄武岩高原的残余。

中国东部在中生代时历经了两次重要的地壳运动，一次是印支运动，一次是燕山运动，而尤以侏罗和白垩纪的燕山运动最为重要。当时，在中国大陆的东缘还没有现今的岛弧带，而是像如今的南美西岸一样，是个活动的大陆边缘。那时的太平洋也还没有出现，其东面的大洋板块叫库拉板块。当太平洋新生之时，推着年老的库拉板块向西运动，并俯冲到亚洲大陆之下。于是，在亚洲大陆的东缘出现了强烈的火山活动与侵入活动。在中国东部，北起兴安岭，南达广东，出现了非常强烈的火山活动（图4—1）。大兴安岭的火山岩是晚侏罗世和早

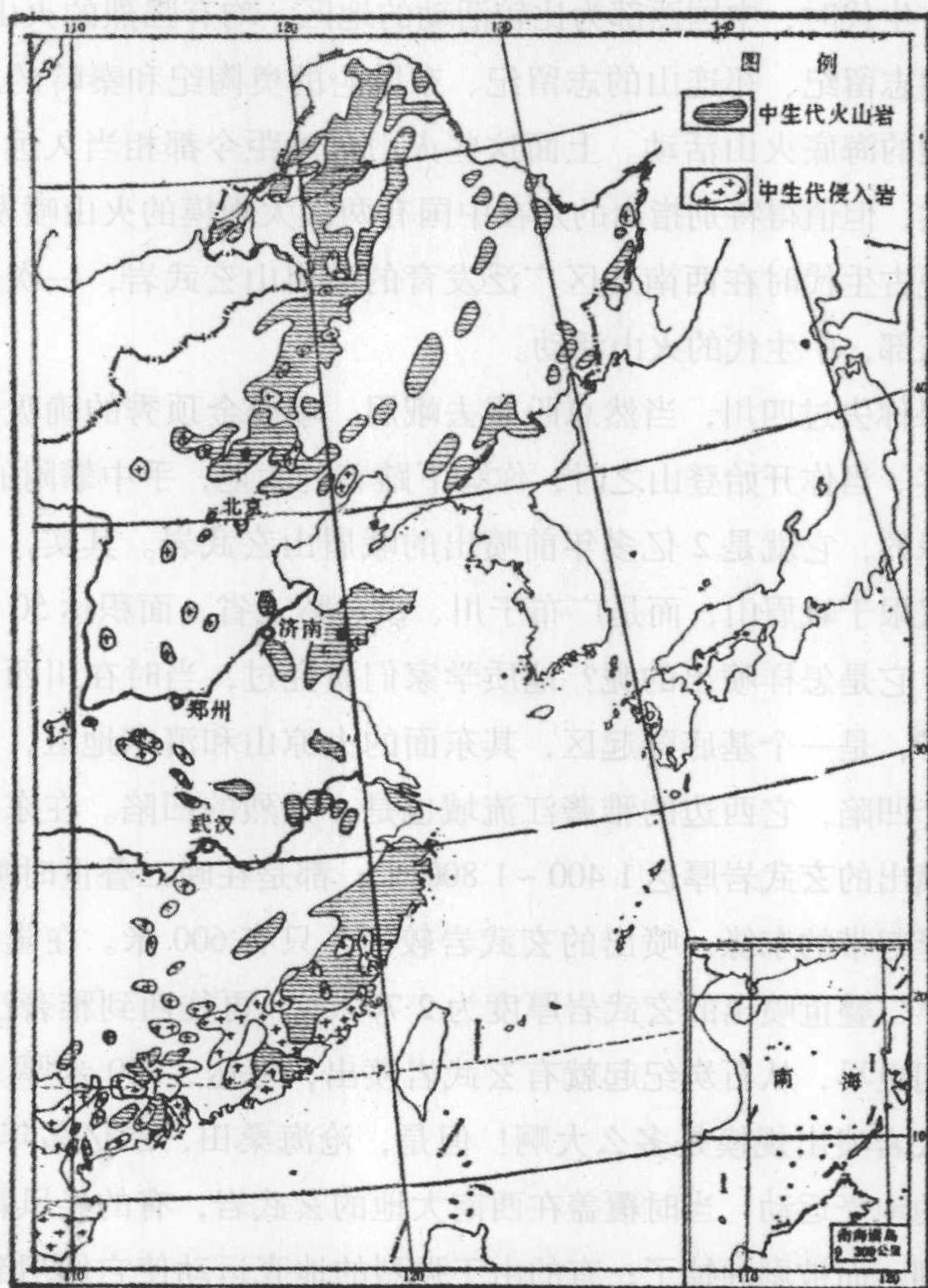


图4—1 中国东部中生代火山岩分布图

白垩世喷出的，厚达3 500余米，下部为中性和基性的安山岩和玄武岩及其成分相同的凝灰岩，厚达2 000米；上部为酸性火山碎屑岩，顶部为酸性流纹岩，厚达1 500米。在华北北部，三叠纪时就有酸性凝灰岩喷出；早侏罗世有玄武岩和辉绿岩喷出，北京香山的鬼见愁就是由这些辉绿岩组成的；中侏罗世时在北京西北地区有巨厚的安山岩和流纹岩；晚侏罗世火山活动见于张家口一带，为红色流纹岩；白垩纪的火山活动主要见于山东半岛，以大规模的中酸性火山岩为主。在东南沿海的浙、闽、粤三省，火山活动出现在沿海一带，喷发活动始于晚三叠世，到晚侏罗世时达到高潮，早白垩世再次强烈喷发，但强度逐渐减弱。火山喷发的类型有中心式的，也有裂隙式的，中心式喷发的火山口多已剥蚀破坏。喷发的岩类非常多样，以中性安山岩、酸性流纹岩和碱性岩类为主，也夹有很多的火山碎屑岩和凝灰岩。厚度各地不一样，晚侏罗世喷出岩有的厚仅400米，最厚的地方可达万多米；早白垩世喷出的最薄400米，最厚5 000米。火山活动和相伴的岩浆活动为中国东部带来了丰富的金属矿产。如江西省的钨矿居世界第一，就是与这时的岩浆侵入活动有关。

二　地球上火山的分布

前一节谈到了中国地质时代的火山，而中国现代的火山是如何分布的呢？为了了解这个问题，让我们先看看地球上火山的分布。

在地球上，火山的分布并不是无规律的。如果你要问在世界上哪些国家和地区火山最多发育，你一定会举出日本、冰岛、夏威夷、意大利和新西兰等。首先，从表面上看起来，这些地区彼此毫不相干。但是，不管你怎么想，你首先看到这样一个事实，所有这些地区离海都不远。这并不是一个毫不相关的事情，因为世界上所有的火山都差不多离海只有数百千米，而在各大陆的中心，火山是极其稀有的。火山对于海洋似乎有着特殊的偏爱。现在让我们更精确地看看它们到底在哪儿发生的吧！如果人们把现代活火山的位置标在一张世界地图上，人们就能发现，地球上存在着几个明显狭窄的火山带。其中，一些是

沿着大陆边缘伸延的，另有一些是沿岛弧带分布的，还有一些是在海洋中排列成行的。图4—3是古近纪以来的世界火山分布图。图中有两个连绵不断的火山带。一是环太平洋火山带，它从南极大陆的南设得兰岛往北延入南美。在南美西部长达7 000千米的安第斯山脉内，火山活动非常活跃，仅10000年内的活火山就有45座。再往北进入中美洲西海岸，沿哥斯达黎加、危地马拉、尼加拉瓜、萨尔瓦多和墨西哥诸国，活火山的数量不少。在中美还出现安的勒斯弧的分支，火山活动也相当发达。从中美洲进入北美西部，新生代火山活动发育，其中最著名的就是黄石公园，它最近一次大喷发是在64万年前，此后断断续续喷发了30次，最近的一次是在7万年前的晚更新世。自1923年开始对它进行监测，2004年以来发现它地下的岩浆囊以创纪录的速度上升，仅仅过去三年，每年上升7.6厘米，因此《每日邮报》网站（2011.1.24）报道："黄石超级火山可能大喷发，将使美国三分之二国土不宜居住！"在北美活火山的数量虽然很少，在美国有几个，但是，1980年就发生了圣海伦斯火山的喷发。在加拿大却几乎没有活火山。由阿拉斯加往西南是阿留申群岛，火山活动又变得十分强烈，它与俄罗斯勘察加半岛的火山相连。从勘察加半岛经千岛群岛延入日本的北海道，然后连接日本弧，在日本富士山附近的大地沟，火山带分为两支。东支沿马里亚纳群岛分布，西支经雾岛火山带进入我国台湾，再南延到菲律宾群岛，在苏拉威西与地中海火山带相接。然后，环太平洋火山带继续往东南经伊里安岛、新赫布里兹、萨摩、汤加到达新西兰。由于环太平洋火山带集中了世界最多的活火山，因此称为环太平洋"火环"。它们喷出的火山岩大部分是贫碱而富含硅酸成分，即属于钙碱性岩系，岩石组合为玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩，其中又以安山岩居多，火山多属层火山。图4—2中的点线代表安山岩分布地区的界线，称为安山岩线。这些钙碱系列的岩石是玄武质岩浆把构成大陆块的物质（硅铝壳）捕虏进去，也就是把它同化之后形成的。因此，安山岩线很可能就代表地壳构造上大陆块的外部边缘。

另一火山带为地中海火山带，它从苏拉威西岛开始，经印度尼西亚岛弧，进入缅甸—腾冲。在印度尼西亚与安达曼海区有着很多活火

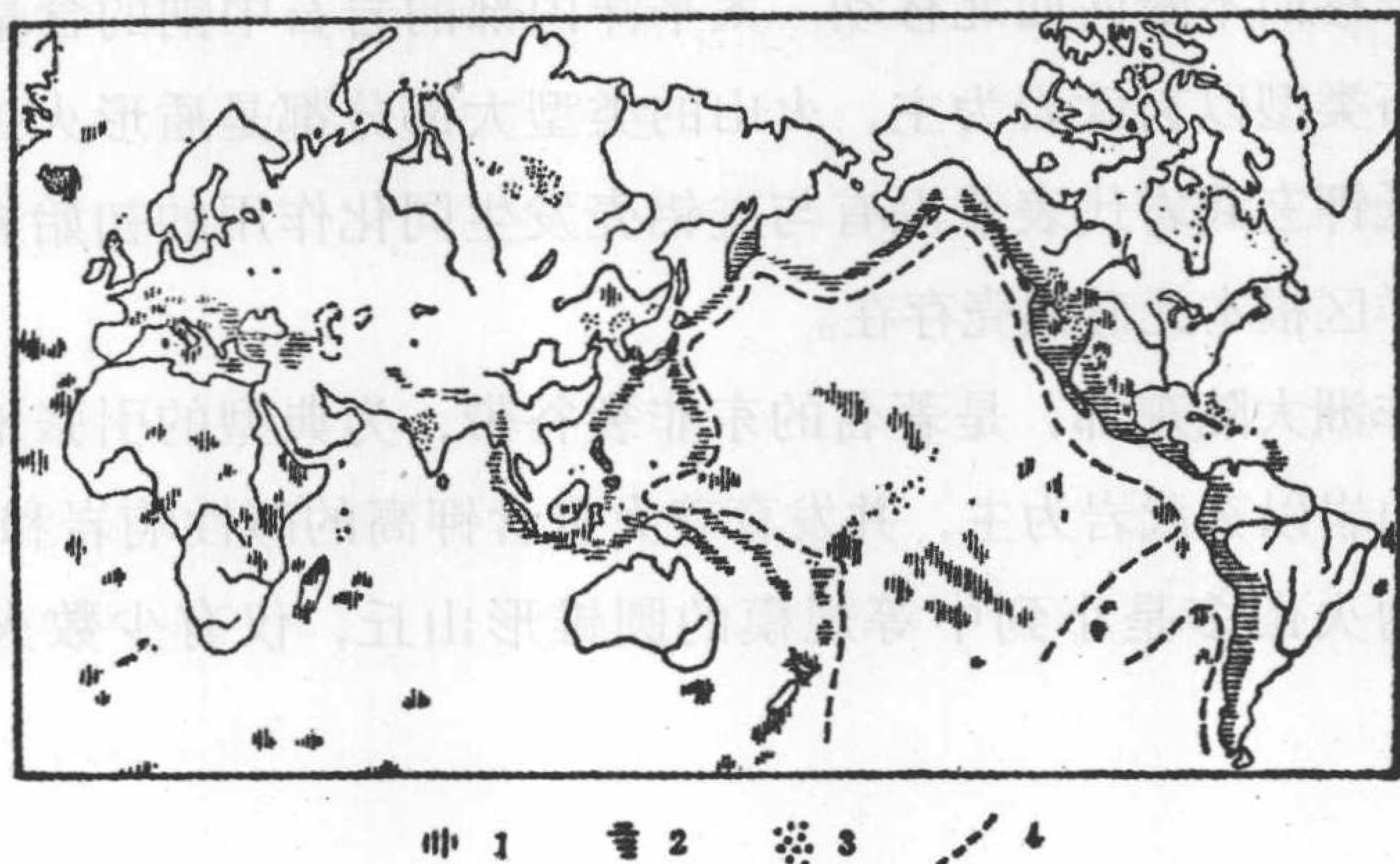


图4—2　世界各地新生代火山分布及安山岩线（据久野久图略加修改）

1. 玄武岩、碱性岩系为主的区域；2. 玄武岩，安山岩，流纹岩为主的区域；3. 高于玄武岩；4. 安山岩线

山，进入大陆之后就缺少全新世火山了。由于缅甸的更新世火山弧往北进入青藏高原，早第三纪的火山分布于冈底斯山脉的北坡，往西进入伊朗、高加索和土耳其，在这些西亚地区仅有少量活火山。往西经喀尔巴阡弧，进入亚平宁半岛，在亚平宁半岛上活火山又非常发育。这个火山带的岩石，在东南亚及西藏，仍以钙碱性岩系为主，但在地中海沿岸，则多为碱性岩系，以富碱、贫硅酸为特征，岩石类型为玄武岩、粗安岩、粗面岩和响岩。

太平洋和大西洋中的岛屿一般都是火山岛。大西洋的火山主要沿大西洋中脊分布。洋中脊是一个扩张中心，海底火山通常在扩张中心升起，然后它们乘在运动着的板块上而增长。如果一个火山升起的速率足够快，超过了原有的海水深度和海底的沉降，它就出露成岛。大西洋中脊附近的火山主要为低钾的拉斑玄武岩。太平洋的岛屿，如同在夏威夷和其他地方见到的那样，呈线状排列，形成列岛。而且，火山的年代随着时间的推移，向着一个方向逐步变得年轻。如夏威夷群岛的火山自西北往东南变得愈来愈年轻。在群岛最东南端的夏威夷岛上，还有许多活火山，这是因为夏威夷岛下是一个热点。热的地幔物质在那里上升，当向西北不断运移的洋壳经过夏威夷岛时，受到下面热的地幔柱的烘烤而发生局部熔融，在洋底形成火山，这些火山随着

时间的推移而不断向西北移动。太平洋内部的岩石中钠的含量要比钾高，岩石类型以玄武岩为主，火山的类型大部分都是盾形火山。大洋岛屿的低钾玄武岩代表着没有与硅铝壳发生同化作用的初始岩浆，因为在大洋区根本无硅铝壳存在。

在非洲大陆东部，是著名的东非裂谷带，为典型的引张地区，喷出的火山岩以玄武岩为主，并发育着大量含钾高的碱性响岩和粗面岩。所形成的火山多是小到中等规模的圆锥形山丘，仅有少数火山为层火山。

三　烽火连天的中国

中国大陆经历了中生代末的燕山运动以后，除西藏南部和新疆西南部以及华北平原的局部地区外，基本上脱离了海洋环境，新生代以来的中国，东部濒临浩瀚的太平洋。太平洋板块向西俯冲到亚洲大陆之下，形成了亚洲东部闻名于世的西太平洋岛弧带。在中国西南，亚洲大陆和印度次大陆发生了陆壳的相撞，造就了世界第三极——世界屋脊青藏高原。在地质历史上这一伟大的变革时期，中国大陆下面有否岩浆活动呢？它们在地表会留下什么样的陈迹呢？喷出的熔岩有什么特征呢？它们受什么地质构造的控制呢？这是人们关心而又感兴趣的问题。

图4—3是中国新生代火山分布图。从图上可以看出，中国新生代火山分布是非常有规律的。火山出现于东北三省、华北东部、东南沿海的苏、浙、闽、粤、皖东和台湾；火山也出现于中国西南边疆的滇西和青藏高原。在中国大陆腹地，可以说几乎没有新生代火山活动。这是偶然的安排还是地质发育的必然结果？在讨论这个问题之前，让我们先来看看各个地区新生代火山发育的情况吧！

台湾位于西太平洋岛弧带，是琉球弧与菲律宾弧的相交处，新生代以来的火山活动比较频繁。从钓鱼岛诸岛中的赤尾屿到台湾岛北部的大屯火山区和宜兰县龟山岛，是日本雾岛火山带的西南端。龟山岛上的龟头和龟尾各有一座火山，并有火口湖，喷出的熔岩为安山岩。

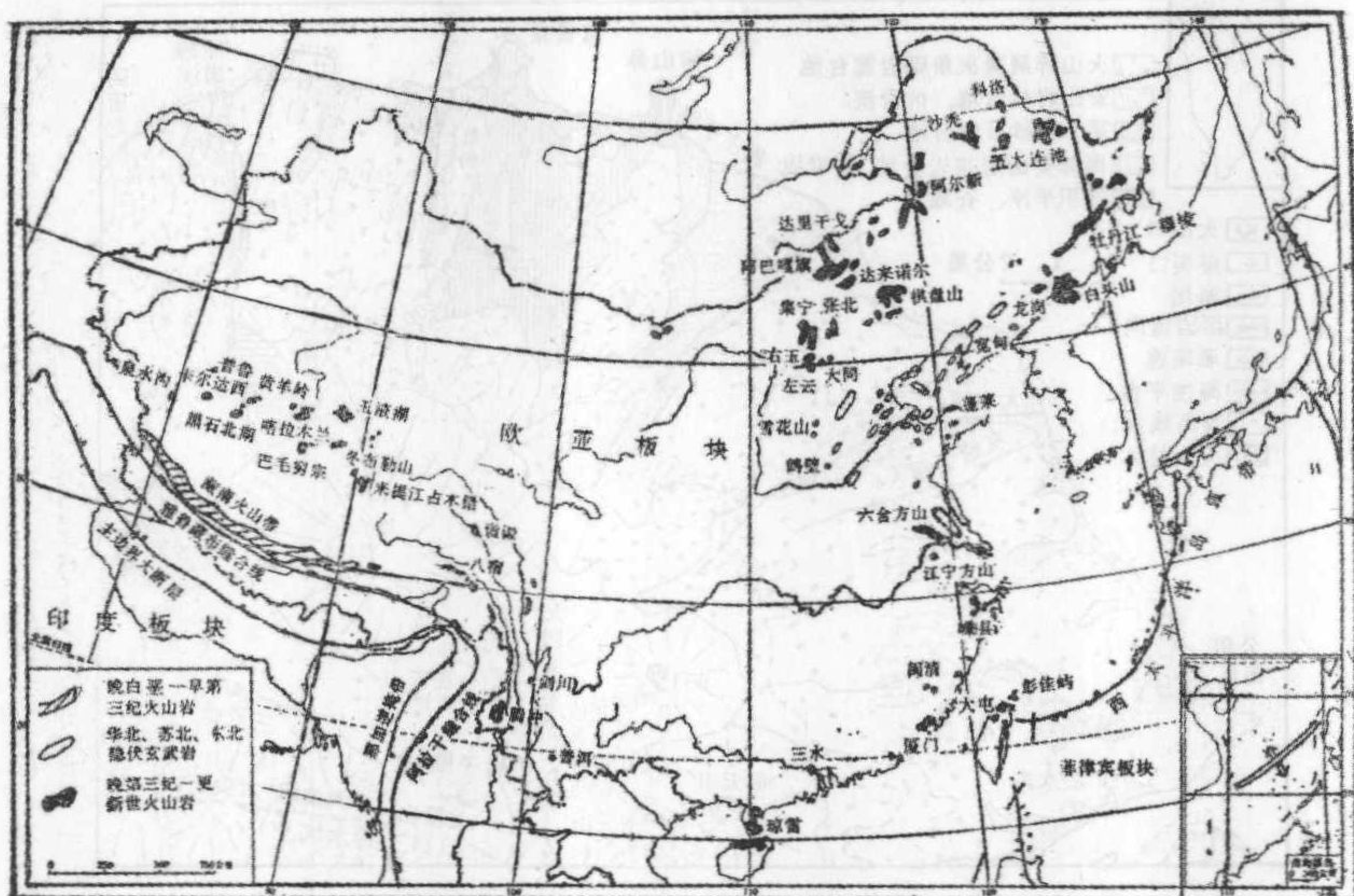


图4—3　中国新生代火山分布图

台北附近的大屯火山群，共有20座火山。火山岩主要是安山岩和凝灰角砾岩，多达15层。整个火山区可以分为8个亚群，以磺咀山、冬瓜山、七星山和纱帽山最为年轻。其中七星山海拔约1 120米，是大屯火山群的主峰，火山锥的形态完整，但由于火山喷发过于猛烈，使火口垣破坏，形成7个圆顶小峰，故名七星山（图4—4）。台湾岛东南的火烧岛和兰屿，都是由于海底喷发形成的火山岛。在台湾西海岸的新竹和台湾海峡中的澎湖列岛，喷出的火山岩均为玄武岩。

在东北平原的东部，是风光秀丽、山水如画的长白山脉，自西南往东北，绵亘上千千米。长白山在汉时称单单大岭，后魏时叫做盖马大山。在郁郁葱葱的茫茫林海之下，是由火山岩构成的盖马高原。从辽宁的宽甸，经吉林的靖宇、长白，到达黑龙江的牡丹江、鸡西，新生代火山岩覆盖的面积达10 000平方千米。其中，分布着几个著名的火山群。长白山火山群面积达2 274平方千米，分布着93个火山锥。其中最著名的是长白山主峰白头山，它是一座海拔2 500米的高大火山锥。火山锥坐落在熔岩高原和熔岩台地之上，山顶白雪皑皑，草木不生，16个山峰嶙峋耸秀，环抱天池，倒映水中，颇有“处处奇峰镜里



图 4—4　台湾北部火山地貌简图（据曾昭璇）

天”之妙。横亘于靖宇、辉南和浑江之间的长白山脉中的龙岗山脉，有着著名的龙岗火山群，熔岩覆盖的面积为 1 400 平方千米，点缀着 164 个明显的火山锥，其中出现 7 个称为龙湾的火口湖，湖滨丛林环抱，水深晶莹清澈，风景秀丽别致。在长白山脉的东北端，于牡丹江与穆棱一带，新生代火山岩覆盖面积近 3 000 平方千米。其火山锥数目虽然不多，但是比较年轻的熔岩，从地下流出后堵塞了牡丹江主河道，形成了著名的火山堰塞湖—镜泊湖。长白山脉的南端有宽甸火山群，火山岩出露面积约 200 平方千米，有 18 个被强烈剥蚀的火山锥。

由东北平原往西，是著名的大兴安岭山脉。无论是在大兴安岭之巅，还是在额尔古纳河河谷和呼伦贝尔草原都分布有新生代的火山岩。其中，最著名的是阿尔新火山群。其火山岩出露面积近千平方千米，有 42 个大小不一的火山锥，图 4—5 是火山群北部大黑沟一带 36 个火山锥分布的情况。

在东北平原的北部是小兴安岭，在伊春林区的北部，出露有近千平方千米的新生代早期的火山区，但火山锥比较少。但是，在大、小兴安岭交接处，则是年轻的火山集中处。著名的五大连池火山区就坐落在这里，千姿百态的火山遗迹使这里成了我国第一个火山自然保护

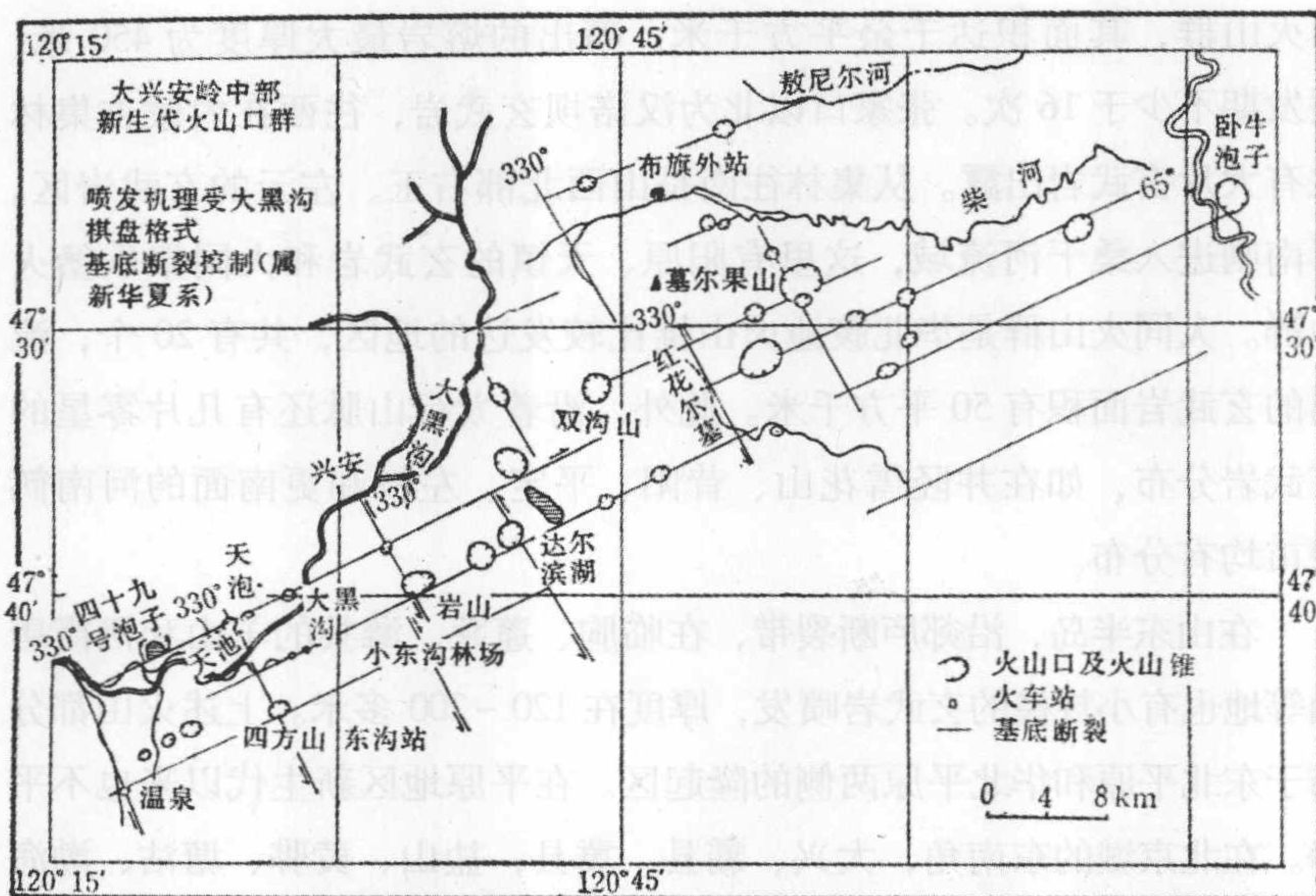


图 4—5　大兴安岭大黑沟一带碱性玄武岩和断裂构造分布图（据唐守贤，1983，略加修改）

区。其熔岩流的面积达600 平方千米，14 座火山锥耸立在熔岩台地上。这里的火山锥有规律地呈井字形排列，这是大自然多么精心安排的图案！在它的北面数十千米，就是科洛火山群，13 个火山锥以东北—西南向排列在长50 千米、宽20 千米的狭长地带内，其中5 个呈截头圆锥状，8 个为小规模的盾状火山。由嫩江城往西北，在诺敏河的中上游，是沙的尔—秃葫芦火山群。它有8 个火山锥，其中一个高100 米，顶上有直径200 米、深50 米的火山口。火山口的中心又有一座新的火山锥，形成一座形式特异的复式火山。

由大兴安岭山脉往西南就是内蒙古高原，辽阔的草原，地势起伏微缓，其间分布着平坦的玄武岩台地，其面积达10 000 多平方千米。它展布于达来诺尔的北岸，向北延展到阿巴嘎旗，直抵中蒙边境。在玄武岩台地上突起了270 个火山锥，椎体一般高达百米。进入蒙古国境内，还有达里干嘎火山群，火山岩的面积达17 000 平方千米，上面繁星般分布着222 个火山锥。

由内蒙古高原往南，越过大青山脉，进入河北北部、内蒙古南部和山西北部，那里也有许多新生代火山岩分布。重要的火山群有棋盘

山火山群，其面积达千余平方千米，喷出的熔岩最大厚度为450米，喷发期不少于16次。张家口以北为汉诺坝玄武岩，往西在内蒙古集林也有大片玄武岩出露。从集林往南是山西北部右玉、左云的玄武岩区。再南则进入桑干河流域，这里有阳原、天镇的玄武岩和大同聚乐堡火山群。大同火山群是华北腹地火山锥比较发达的地区，共有20个，流出的玄武岩面积有50平方千米。此外，沿着太行山脉还有几片零星的玄武岩分布，如在井陉雪花山、昔阳、平定、左权和更南面的河南鹤壁市均有分布。

在山东半岛，沿郯庐断裂带，在临朐、蓬莱、潍县的羊山和栖霞唐山等地也有小规模的玄武岩喷发，厚度在120～200多米。上述火山都分布于东北平原和华北平原两侧的隆起区。在平原地区新生代以来也不平静。在北京城的东南角，大兴、霸县、冀县，盐山、黄骅、塘沽、渤海湾、下辽河东部凹陷、沈阳凹陷、沈北凹陷等地，从钻孔中分别揭露出1～10层玄武岩。这些凹陷在新生代时堆积了巨厚的浅海沉积物，可见当时的火山喷发也是在海下喷发的，只有最年轻的火山才喷出到地表（如黄骅的小山和无棣的大山）。在东北平原内还有一些局部的隆起地点（如铁岭至长春一带），有许多火山孤山出露，在长春有大屯的富峰山，怀德的平顶山和双辽的七星山，它们都是由玄武岩组成的。

在长江中下游，南京附近的长江两岸也有20余座火山。在长江北岸，从安徽的嘉山到江苏的六和、仪征，就有10余座火山。嘉山县女山湖东岸的女山，高达五六十米，上有直径400米的火山口。六和、征仪间的方山火山群，有10余座以玄武岩构成的火山丘和平顶山。其中以方山最为典型，它高为150米，山顶平缓，内部凹陷，为火口所在。此外，在江北还有浦镇的猪头山。在长江南岸，火山零散地分布于江宁和句容两县，它们是江宁的方山、射乌山和句容的赤山，都是由橄榄玄武岩组成，3个火山以北西西向排成一条直线。

浙江的新生代火山岩，分布于浙东四明山周围的余姚、新昌、宁海、三门和临海诸县。地层上称嵊县组，为玄武岩。福建也有新生代玄武岩喷出，规模较小，见于长汀、漳平、闽清和厦门一带，其中以厦门、漳州一带最为典型，称为佛昙组的上段，为橄榄玄武岩，总厚

达150米。广东的新生代火山岩，主要出露在雷琼海峡两岸，有大片的玄武岩台地，形成7个巨大的岩被，总面积为7 500平方千米。其上分布着80座火山锥，相对高度仅数十米。湛江的名胜湖光岩就是一个火山湖，湖面近圆形，水深达20米。另外，在三水盆地、河源和连平诸县均有火山岩零星分布。

西藏南部在新生代早期火山活动最为强烈，当时的西藏酷似现在的南美洲安第斯山脉，到处是乱石飞天，熔岩滚滚。它所留下的陈迹是在冈底斯山脉的北坡，西起阿里，东至昌都八宿，留下一个长达千余千米、宽达近百千米的连续的火山岩带。由于火山喷发的时代可能从晚白垩世延续到古近纪，火山结构都没有保存，所喷出的熔岩不同于中国大陆东部的玄武岩，而与环太平洋火环的火山岩相似，它以中性和中酸性的安山岩、英安岩与流纹岩为主。

藏北高原和青海南部，地处荒漠，渺无人迹，那里的火山过去虽有零星的报道，直到1951年昆仑山中的一声轰鸣，才引起了人们的注意。但究竟有多少火山？只在近来通过航空照片的判读才发现，自西而东不少于10群。现叙述如下。

①泉水沟火山群，位于阿克赛钦湖东北约40千米处，恰在昆仑山脉的南麓。从航空照片上判读，可能有4个火山锥和一片熔岩被。

②乌鲁克库勒火山群，又称卡尔达西火山群，位于昆仑山脉的一个山间盆地内，恰为科里亚河的河源。盆地内有两个火山堰塞湖——阿其克库尔和乌鲁克库勒，湖边有4个火山锥，1951年爆发的恰在两湖之间叫卡尔达西火山或阿什山。该火山区往北是硫磺大坂，附近有一片熔岩被。由乌鲁克库勒往东南，至吉里雅山口，还发现有8处火山。该火山群自19世纪末以来就多次有外国探险家涉足，并有报道。

③普鲁火山群，位于昆仑山脉北麓，大片熔岩被分布于克里雅河两岸，均被风沙严重掩埋。在普鲁村北的剖面中，可见两层玄武岩，两者之间夹有河床相砾石层。

④黑石北湖火山群，位于昆仑山脉南坡黑石北湖南岸。地理坐标为北纬35°38′，东经82°41′。在这片熔岩中，可以见到两个明显的火山锥，并可以看出大片熔岩流流入黑石北湖的痕迹，熔岩流掩盖了所有

的湖岸沙堤，这说明火山的喷发十分年轻。

⑤黄羊岭火山群，位于黑石北湖东北，其经纬度为：北纬36°17′，东经83°45′。从航空照片上可以看出，火山体沿山麓一字排开，并可见到明显的火山锥、火山口和火口垣。

⑥喀拉米兰山口西南火山群，其经纬度约为：北纬35°40′至36°10′，东经86°20′至87°10′之间。1976年中国科学院青藏高原综合科学考察队曾发现了涌波错、振泉错、和强巴欠日三片熔岩被，其面积分别是10、20和100平方千米，未见到火山锥，火山岩为辉石安山岩。1896年一个英国人从南疆且末出发，越过昆仑山，在喀拉木兰山口附近见过4个火山，继续南下，在东经87°附近又见到6个火山。

⑦巴毛穷宗火山群，位于藏北高原腹地，地理坐标约为：北纬34°50′、东经87°05′。为一片面积300平方千米的熔岩被。由于遭受强烈的剥蚀，形成熔岩桌状山。有两个明显的火山口，火山锥体均不大，直径约一千米，北部一个高63米，南部一个高182米。喷出的熔岩为强碱性霓霞岩类、正长—响岩类和粗面岩类。

⑧玉液湖火山群，位于可可西里山北麓，经纬度为：北纬36°00′至36°30′与东经88°30′至89°00′之间。航空照片判读为大片熔岩被，并在玉液湖东岸和东南角可以见到明显的火山锥，且火口垣明显。1900年10月左右瑞典人斯文赫定曾经路过此处，发现在北纬36°、东经87°至89°北侧有6片火山岩，无火山口，覆于硬砂岩层之上。

另外，在该火山群以东，于阿尔格山南麓和勒斜武担湖之间，也零星散布着一些火山锥，在1∶100万温泉幅地质图上已有所表示。

⑨冬布勒山火山群，于1900年9月中旬，斯文赫定在北纬35°、东经89°处发现大片火山岩，后定名为古铜安山岩，报道中未见有火山锥。并于北纬35°、东经89°至90°之间南侧发现4片安山岩露头，同时在北纬35°30′、东经90°西侧附近发现两个小圆山包，为角闪安山岩。这两个小山包是斯文赫定特别强调指出的，但未提及有火口。

⑩米提江占木错火山群，位于该湖的北部，为大片熔岩被，所占面积近4 000平方千米，为含透长石玄武岩、安山岩，厚达400米。

此外，在唐古拉山与杂多县之间，有许多小型碱性岩枝，侵位于

新近纪之中。玉树地区囊谦火山岩，过去认为是印支期产物，现在测得同位素年龄为73.9万年前，属早更新世。

昌都地区在澜沧江与金沙江之间，在芒康拉屋拉和贡觉一带也有呈裂隙状喷出的火山岩。

由昌都地区往南进入云南，在怒江断裂带以西分布有著名的腾冲火山群。其熔岩分布的面积近1 000平方千米，有明显的熔岩台地和熔岩穹丘及规模较小的盾状火山，最显著的是有20余个典型的截头圆锥状火山锥。实际上腾冲火山群是缅甸中央火山带的一部分。

在怒江断裂带以东，新生代火山比较少。它集中在两个地区，一是分布于剑川附近，沿弥沙河断裂带分布，主要出露为碱性粗面岩。另一处分布于普洱附近，在普洱周围出现6片规模不大的玄武岩，火山结构不清楚。

四　不平静的年月

在中国的东部和西南，新生代以来的火山活动非常活跃，火山星罗棋布。然而，我们的祖先所记载的火山活动又十分稀少。那么，在新生代的6300万年的历史长河中，火山是在什么时候喷发的？它们的喷发是否存在一定的规律性？又怎么知道它们是什么时候喷出的呢？

要知道火山喷出的年代，目前大体采用下列的方法：一是传统的地质学方法，即根据火山喷出物的上部盖岩层和下部的被覆盖层所含的生物化石来确定它们喷出的相对年代；二是测定火山岩的同位素年龄。目前测定年龄的方法非常之多，最常用的就是下面几种：如果火山喷发年代老于10万年，可用铷—锶法；如果为3万~10万年可用铀—铅法；铀系法则适用于0.5万~30万年间喷出的火山岩；测定范围最广的是钾氩法；热释光法所测的年代可在前500年至100万年间；^{14}C法只能测<4万年~5万年的样品；而裂变径迹法所测的年代无限定。当然，人类历史时期所喷发的火山，历史记载是确定火山喷发年月最可靠的资料了。

自新生代开始，6300万年来，中国的火山活动从来没有停歇，而

是此起彼伏，有时是西强东弱，有时候是东强西弱。

新生代最早的时期，地质历史上称为古近纪，我国火山活动最强烈的地区是在西藏南部。那时的藏南就像现在南美洲西海岸或像日本和菲律宾。日本被称为火山之国，这是由于太平洋的洋壳向西活动，在日本东部的海沟下插到日本岛弧之下，由于摩擦熔融，形成岩浆，喷出地表造就了日本众多的火山。那时的西藏，在现今的雅鲁藏布江的地方，也是印度板块向北下插到亚洲板块之下的地方。因此，在江北的冈底斯山地区也是岩浆活动强烈的场所，形成了冈底斯北坡长达数千千米的火山带。但是，随着印度大陆壳和欧亚大陆壳在始新世时相撞，那里的火山活动也就销声匿迹了。

同时，中国大陆的东部地理面貌和现在也不一样。当时的华北平原、东北平原和苏北平原就像现在的渤海一样，汪洋一片，虽不甚辽阔，但也波涛汹涌。它们虽一边接受着从中国大陆古老的河流带来的泥沙，但由于它们是沿着断裂带形成的，深切着地壳的断裂，把地下的岩浆断断续续地带到了海底，形成了许多海底火山。这些情况，过去我们并不知道，只是在20世纪60年代以后，由于勘探石油和其他矿产，从钻探的结果我们才知道，取上来的岩心有的地方是一层砂土、一层玄武岩。如在渤海及其岸边的黄骅，就发现10多层玄武岩，每层厚度在2～15米不等。从它们所夹的砂层中所含的化石，才确定这些火山岩是在古近纪喷出的。这种深埋玄武岩在辽宁的抚顺、黑龙江的牡丹江和苏北平原都有发现，而且从夹层中的化石判定它们都是古近纪的。从华北平原经渤海到东北平原，总体来说是一连续的北东向凹陷，但在凹陷之中也有些隆起地区，那里也有火山岩的喷发，现在还可以见到一些饱经风霜、剥蚀得已经不太明显的火山锥，如长春的富峰山，年龄为7850万年，怀德的范家屯平顶山（7350万年）和双辽的七星山，它们的同位素年龄表示的是晚白垩世晚期的产物。

在当时，华北平原和东北平原的两侧以及闽浙一带，都是正在遭受剥蚀的隆起区，只有极少数的玄武岩在有限的地域喷出，如山西北部的左云、右玉和凡寺的玄武岩，而后者的年龄测定为6300万年前。

在华南，古近纪的火山岩仅见于广东省的河源和三水盆地，在连

平和雷州半岛也有发现。它们夹于这一时期沉积的红色岩层中，有时从钻孔中也可显露。如在三水小塘，60 米厚的杏仁状玄武岩，产于古近纪红层中，其同位素年龄为 6400 万年。三水西樵山走马营还发现 4700万年的粗面岩。

到了2500 万年前，地球的历史进入新近纪。那时，华北平原和下辽河凹陷逐渐被淤浅，火山活动也逐渐衰竭。在它们与相邻的隆起交接的地方还有一些小盆地，在这些小盆地中还有一些火山活动。如鸭绿江流域新近纪早期的中新世马鞍山组中夹有两层玄武岩；在渤海湾的钻孔中也揭露出 4 层玄武岩，每一单层的厚度在 100 余米到 300 余米不等；同样的情况在下辽河凹陷区也有见到。这一时期主要的火山活动已经迁移到原来盆地两侧的山区。在大兴安岭地区，开始喷出兴安玄武岩，厚度 >30 米，它们现在分布在高达 1 400 米的大兴安岭分水岭之上。继而，喷出厚 20 ~ 80 米不等的五岔沟玄武岩，喷发的旋回达 5 次之多，它的分布面积也最广。在长白山脉，这时的玄武岩喷发面积也最大，在龙岗地区称为船底山玄武岩，厚度 >600 米；在长白山区叫做张广才岭玄武岩，厚度 >470 米；在牡丹江—穆棱一带，厚度减少到 50 米左右，但是分布面积仍达到 3 000 平方千米。

在燕山山脉附近，有张北县的汉诺坝玄武岩（1800 万年 ~ 2300 万年）和赤峰西部的棋盘山玄武岩，它们均以裂隙式喷发为主。棋盘山玄武岩厚度为 450 米，测得的年龄为距今 2 210 万年。在山东半岛的沂水、潍坊、莱阳和临朐一带喷出了近 200 ~ 400 米不等的玄武岩，有的还是多次喷发的。

在华东，经过长期剥蚀之后，一些断裂又重新复活，沿着它们有相当强烈的火山喷发。如山东的蓬莱、栖霞地区（400 万年 ~ 600 万年），江苏长江两岸的方山玄武岩、浙东嵊县玄武岩和福建漳州一带的佛昙组上部玄武岩，台湾海峡的澎湖玄武岩和台湾新竹的玄武岩以及大屯火山区部分安山岩，都是上新世的喷发物。

在广东，三水盆地的石头和河源盆地的大红岩的玄武岩也是这时喷出的。另外，在海南岛金牛岭一带，火山岩体被海口组贝壳碎屑岩所夹持，玄武岩 K-Ar 年龄为 382 万年。

这时，中国西部的情景则是另样。由于印度板块与欧亚板块的两个陆壳相撞，南部的陆壳不能再像以前那样俯冲到北部的陆壳之下，而是使西藏地区承受了来自南部的挤压。尽管在西藏南部由于摩擦发生了陆壳的重熔，但是在强大的挤压作用下，重熔形成的岩浆不能上升到地表而形成火山，代之是藏南地区出现许多新近纪侵入体。在西藏北部，一些巨大的断裂重新活动，自中新世以来，许多岩浆沿它们上溢，形成火山。在藏北地区以中心式为主；在昌都地区，承受了最大的挤压力，只有极少量岩浆沿着断裂带呈裂隙式喷发。在腾冲地区，由于是处在印度板块的东侧，承受的侧向挤压力，当两个大陆碰撞时并没有火山活动。但是到新近纪后，沿缅甸中央谷地开始裂开，也影响到腾冲地区沿着龙川江和大盈江河谷，喷出相当面积的上新世玄武岩和安山岩。同时，在洱海北部，沿着红河断裂带，由于断裂东盘向东南错动，出现了一些近南北向张裂断层，沿着它们有剑川的碱性岩的喷发。

更新世开始，人类开始在地球上出现，这是地质史上的一件大事。在早更新世时（300 万年～100 万年前），中国的火山活动最强烈的地区是内蒙古高原。数百个火山锥从茫茫的高原次第拱起，给单调寂沉的草原增加了不少的生气。这些火山喷出的熔岩流有的覆盖在上新统砖红色的泥岩之上，有的覆于早更新世早期的砾岩层之上。在大兴安岭和长白山区，虽然在较大范围内还有火山喷发，但规模要比上新世时小得多。大兴安岭地区喷出的西口玄武岩虽数次喷发，但厚度却只有 60 米；在长白山区，玄武岩也是数次喷发，在图们江五级阶地上的白金玄武岩喷发时代为 292 万年前，长白县鸭绿江河谷五级阶地上的灵光塔玄武岩为 166 万年前，长白山北侧军舰山玄武岩为 103 万年前，龙岗地区小椅山玄武岩为 120 万年前。在华北，沿着太行山脉喷出了井陉的雪花山玄武岩和昔阳、左权与鹤壁一带的玄武岩。在平原地区，喷发是小量的。在邯郸附近的肥城、永年一带，钻孔有所揭露，其时代与雪花山玄武岩相当。在黄骅地区喷出的玄武岩，现今已埋在 340～470米深处。

在早更新世时，除台湾大屯火山区可能有安山岩类喷出外，整个

东南沿海的闽浙一带相对沉寂，而在雷琼海峡两岸，主要是在海南岛北部及广阔的南海海域，形成了广阔的玄武岩被，厚度为10~150米不等，并出现23个火山口。西沙群岛的高尖石岛火山喷发是在205万年前。文昌文草湖玄武岩钾氩年龄距今62万年~63万年，临高美夏海边玄武岩的钾氩年龄为距今73万年。

在中国的西南，腾冲地区的早更新世安山岩和英安岩（约100万年前）喷发极广，形成腾冲城东及东北的高大山体。在西藏北部可能也有这一时期的火山喷发。

100万年~20万年前是中更新世，是蓝田猿人、北京猿人和许家窑人在渭水流域、周口店山区和山西西阳活动的年代。这一阶段最重要的火山活动是长白山主峰白头山的形成。它耸立在早更新世喷出的玄武岩台地之上，成为我国最重要的火山。同时，在龙岗火山群西部的大椅山一带，出现了26个小的熔渣锥。在小兴安岭的五大连池地区和科洛地区也有火山开始喷发。在大兴安岭喷出的是厚约20米左右的大黑沟玄武岩。

在华北平原，黄骅和无棣一带有玄武岩喷出，目前有的已埋在155~270米的深处，有的为55万年~86万年前的孤丘。在当时的隆起地区，则有山西阳高玄武岩和张家口乌梁台玄武岩和围场玄武岩的喷发。想必当年的许家窑人一定看到了阳高玄武岩喷发的情景。

在这一时期，整个东南沿海，在台湾大屯火山区有着强烈的火山活动。而海南岛的儋县一带的玄武岩喷出期距今约21万年~31.9万年。

中国西部较确定的火山是腾冲地区4个玄武岩火山，它们呈盾状火山的形式平静地喷发，如东大坡头、马耳山。目前它们都受到强烈地风化。

我国晚更新世的火山活动十分有限。主要发生在长白山脉。龙岗火山群东部100多个火山锥就是这时喷出的。在火山群东部靖宇县白江河河谷二级阶地上，玄武岩所覆盖的碳化木测得的年龄为35370年前。华北地区大同火山群也是这一时期喷出的。在渤海湾边的黄骅拗陷中，埋在40~150米深的玄武岩，据推测也是同期的喷出物。雷琼海

峡两岸，火山活动重新开始，形成5片小熔岩被，33个火山锥。锥体的下部为火山碎屑物，上部为熔岩。喷出物的总厚度为80～190米。据长流新海林场钻孔揭露出4米厚的玄武岩，钾氩年龄为9.83万年。有些火山口形成火口湖，如湛江湖光岩。腾冲地区大部分截头圆锥状火山锥都是在这一时期喷出的，但是各个火山的喷发时间先后不一。根据钾氩稀释法测得的年龄资料，最著名的打鹰山、马鞍山和黑空山的基座都是在5万年前喷发形成的。在藏北高原，有哪些火山是这时喷出的，尚无可靠的资料。

在1万年前，地质历史进入了全新世。我们的祖先开始会制造陶器。全新世以来的火山叫做活火山。虽然，这时许多耸立的火山并无历史的记录，但是1万年的历史在地球46亿年的历史长河中只不过是短暂的一刹那。虽然这些火山不是时时在喷发，只不过是在作短暂的休眠罢了。

中国有多少活火山呢？在本书的卷首，我们知道了白头山、五大连池的老黑山和火烧山，以及1951年喷发过的昆仑山中卡尔达西火山。其实，还有一些活火山，因为种种的原因不为人们所知晓。这里值得提出的有下列几处：

在吉林省龙岗火山群的160多个火山锥中，大椅子山、孤山子、金龙顶子和元宝顶子应该是全新世喷出物。它们所喷出的玄武岩流盖住了一层火山渣，在地质上称为“四海火山渣层”，其厚2～3米，中夹黑土。采自火山渣中的碳化木，测得的^{14}C年龄<200年前。因此，四海火山渣层的喷发应该是清朝乾隆年间的事，而比这些火山渣更年轻的玄武岩熔岩流，当然是在乾隆年间或其后喷发的。

在大、小兴安岭交接处有一条呼玛河，从西往东注入黑龙江，在它的北岸可能有座察哈彦火山，于清朝乾隆年间至嘉庆年间喷发过。因为在《黑龙江外记》中曾有“峰上穴，昼见焰，夜见火，四时腾炽不绝”的记载。但“察哈彦”今究竟在何处？它是否真是火山，都待考。

腾冲火山群中的马鞍山曾经被推断为全新世火山，后来用钾氩稀释法测得其同位素年龄为5万年前，应属于晚更新世。近期有人用铀系等时线法测得其年龄为7000年，因此可以肯定马鞍山在全新世喷发

过。腾冲火山群的黑空山火山，用钾氩稀释法测得的年龄为5万年~6万年，为晚更新世。1992年笔者曾陪伴日本东京大学地震研究所数人到过黑空山。日本人在黑空山火山口内的一个巨大火山弹上采了样，用钾氩法测得的年龄为7000年。因此，可以说黑空山在全新世早期也喷发过。

除了陆地上的活火山外，在台湾省东北的海区还发现了4座海底活火山。有人曾看到，在彭佳屿东北约70千米处，于1916年4月18日和1927年6月1日曾两度喷发过。当时海面喷出大量的蒸汽，海水变色，并受到火山喷发的冲击而掀起汹涌的巨浪。

台湾岛东部的龟山岛，如今喷气孔和硫质气孔发育，白烟袅袅，实是火山活动的后期现象。据高山族传说，在清朝乾隆年间，多罗差社老番曾亲自见到龟山开裂和熔岩流溢的现象。清初《噶玛兰志》（即今宜兰县志）称："霹雳一声流血股，惊走生番驰无还"的诗句，描述了当时龟山岛火山爆发的情况。

在海南岛，有些火山也认为是全新世的。它们喷出的玄武岩被较新鲜，厚10~150米，共发现23座火山锥，多为碎屑锥。本期火山岩属布容正向极性世，似在距今0.8万年~1.0万年的哥德堡事件之后，属早全新世。



图4—6　中国活火山分布图

此外，还有一些火山，很难确定它们在全新世是否喷发过，如大屯火山区的七星山与纱帽山以及大兴安岭地区一些火山口附近的火山渣锥和舌状熔岩流等，就不在此一一列举（图4—6）。

从中国新生代火山活动的历程看，西藏地区活动最强烈的时候是在古近纪，而中国东部是在新近纪的上新世，自更新世以来活动就逐渐减弱，而全新世的火山已经是寥寥无几了。20世纪90年代刘嘉麒将中国新生代火山分为10个幕。（表4—2）。

表4—2　中国新生代火山幕概况

火山幕	时代与年龄	活动方式	规模	岩性特征	主要分布区
五大连池幕（X）	全新世（<1万年）	中心式喷溢型（老黑山型）	中等	钾质玄武岩，碱性玄武岩，少数含包体；碱性粗面质浮岩，火山灰，砾，火山碎屑岩	老黑山、火烧山、长白山天池、龙岗四海、镜泊湖牡丹峰、大兴安岭大黑沟、腾冲黑空山，马鞍山、雷琼、台湾七星山、西昆仑卡尔达西
白头山幕（Ⅸ）	中晚更新世 0.73~0.06Ma（百万年）	中心式喷溢型（白头山型）	大	碱性粗面岩，碱性玄武岩，钾质玄武岩，含包体很少；火山碎屑岩，安山岩，粗安岩	白头山，五大连池，科洛，二克山，诺敏河，大兴安岭天池，华北平原，莱州湾，嘉山，明溪，大屯，雷琼，腾冲，阿什库勒
龙岗幕（Ⅷ）	早更新世 1.6~0.90Ma	中心式喷溢型喷发，少数溢流式	大	碱性玄武岩含大量包体，火山碎屑岩，河谷玄武岩不含包体，安山岩，粗安岩	龙岗，宽甸，达来诺尔，松花江，图们江二级阶地，阿什库勒，女山，明溪，雷琼，台湾，普鲁，雄鹰台，腾冲
军舰山幕（Ⅶ）	上新世 5.0~2.1Ma	溢流式 中心式	中等	碱性玄武岩，过渡型玄武岩，典型拉斑玄武岩，不含包体；流纹斑岩，粗安岩	长白山，阿巴嘎旗，蓬莱，明溪，雷琼，南海，木孜塔格，泉水沟，阿什库勒西山

续表

老爷岭幕（Ⅵ）	晚中新世 12～7Ma	裂隙溢流式（老爷岭型）	大	碱性玄武岩，不含包体；拉斑玄武岩，粗安岩	老爷岭，张广才岭，东宁，伊通东尖山，围场，集宁，内蒙古五岔沟，临朐—昌乐，栖霞，嵊县—新昌，南海，雷琼，六合—仪征，多格错仁，涌波错
奶头山幕（Ⅴ）	中中新世 16～12Ma	中心式拱出型(奶头山型)	大	碧玄岩，碱性玄武岩，普遍含深源包体；粗安岩	安图县奶头山，和平营子，伊通，围场，集宁，汉诺坝，临朐—昌乐，沂水—安丘，嘉山，龙海，澎湖群岛，羊湖
甑峰山幕（Ⅳ）	早中新世 23～19Ma	中心式拱出型溢流式	小	碱性玄武岩，很少含包体；粗安岩	甑峰山，西尖山，赤峰，集宁，汉诺坝，临朐－昌乐，溧阳，台湾公馆，可可西里
下辽河幕（Ⅲ）	渐新世 38～27Ma	裂隙溢流式，岩筒，多层次（韵律）	大	碱性玄武岩，过渡型玄武岩与沉积物互层，煌斑岩，粗安岩	下辽河，长白马鞍山，冀中凹陷，雷琼，澎湖群岛，羌塘，囊谦，剑川，大理
双辽幕（Ⅱ）	始新世 50～40Ma	裂隙式 中心式拱出型	中等	富橄碧玄岩，碱性橄榄玄武岩，含较多的包体；拉斑玄武岩，粗面岩，英安岩	双辽七星山，牡丹江黄花，抚顺老虎台，下辽河，山西黄花岭，黄骅拗陷，溧阳，三水，改则，措勤
大屯幕（Ⅰ）	晚白垩世至古新世 86～60Ma	裂隙式 中心式	小	拉斑玄武岩，高铝玄武岩，英安岩，安山岩，流纹岩	长春大屯，范家屯，双辽小哈拉巴，通辽大吐尔其山，嘉山明光镇，广东三水，林子宗，羊八井，措勤

注：据刘嘉麒，1999 年。略有修改。

五　并非偶然的安排

当你读完上面一部分，你对什么是火山，什么是火山岩，中国自新生代以来哪里曾喷发过火山以及在什么时候喷出过火山，已有了初步的了解，那么你一定会感兴趣进一步发问：**为什么中国的火山只分布在中国的东部和中国的西南呢？中国东部的火山喷出的是什么样的岩石呢？中国西部的火山岩在成分上与中国东部的有多大区别？或许最后你还会问，造成这种现象的原因是什么呢？它们是偶然的安排吗？**

1950年以来，我们的地质学家踏遍了祖国的山山水水，对大好河山的各种各样的岩石都已经有了初步的了解，其中也包括全国各地的新生代火山岩。他们采集了这些岩石的标本，有的磨成薄片，在显微镜下进行研究，有的被磨成细细的粉末，进行了化学分析，测定它们所含的各种氧化物的含量，从而使我们对中国新生代的火山岩和它们发生的地质背景有了初步的认识。

如果把收集到的中国东部新生代火山岩的岩石化学资料投影到上面所介绍的 SiO_2 对总碱（$Na_2O + K_2O$）的含量图上，就会发现如下的特点。中国东部的火山，除台湾大屯火山区属高铝系列的安山岩和白头山区为碱性系列的碱流岩外，其他的均属玄武岩。这些玄武岩有的属拉斑系列，有的属钙碱系列，也有的属于碱性系列或超碱性系列。如果你再仔细分析，长江以北地区，属非碱性系列的玄武岩主要是华北平原和苏北平原的隐伏的古近纪玄武岩，它们都与海相沉积物伴生。从岩石的结构特征来看，也是在冷却速度较快的深水环境下固结的。到新近纪和第四纪，玄武岩都是陆相的碱性玄武岩，而且喷出时代愈新，碱的含量愈大。上述玄武岩的分布明显地呈北东向排列，受切穿了地壳的深断裂所控制，而且在碱性玄武岩中常常夹有含尖晶石二辉橄榄岩的包体。它们原来是地幔中的岩石，被向上运移的岩浆带到了地表，因此长江以北中国东部的玄武岩形成深度可能在50千米以下。

为什么会出现这种情况呢？在白垩纪以前，日本与中国大陆是合在一起的。由于中国东部的库拉板块向西俯冲，欧亚板块向东仰冲，

从白垩纪开始，使日本列岛与东亚大陆分离，两者之间出现日本海和黄海。到古近纪由于太平洋板块的俯冲，华北和东北亚地区进一步仰冲，又形成了一系列北东向的凹陷。凹陷沿断裂发生，在其下部压力突然下降，造成莫氏面向上拱曲，并使得原来处于高压下的固体物质发生部分熔融，产生岩浆。岩浆在海底喷发，形成古近纪的非碱性的玄武岩。它们的 Si、Al、Ca 的含量都不高，说明受地壳物质的混染很少，岩浆源深度达到 50 千米。

自新近纪开始，现今的渤海和周围的平原整体下陷，构成一个统一的断陷盆地，盆地和周边山区的新生界底面的落差可达 13 千米以上，因此火山活动的中心也挪到盆地的边缘，喷出了碱性和强碱性的玄武岩，岩浆源的深度达到 70 ~ 100 千米。天池的碱性粗面岩和碱流岩代表岩浆分异后期的产物。长江以北新生代火山岩分布范围很广，这是由于那里的地壳十分破碎。

在长江以南，中国大陆与太平洋板块之间，隔着菲律宾板块和南海海盆。新生代的火山活动只出露在浙、闽、粤三省东部很狭窄的范围内。其火山岩的岩石特征是，中新世时喷出拉斑玄武岩，演化为上新世的碱性橄榄玄武岩，而早、中更新世时又出现拉斑玄武岩，演变为晚更新世—全新世的碱性玄武岩。由于闽、粤地区濒临南海，根据近年的研究，发现南海是一个在加里东褶皱基底上由于扩张作用形成的海盆。扩张时期是在中渐新世到早中新世，而扩张中心由原来靠近中国大陆边缘到后来南移到现在的北纬 15°附近，沿扩张中心出现了许多北东向的海底火山。不断生出的洋壳往南沿马尼拉海沟俯冲到菲律宾群岛之下，往北则没有发现俯冲带。在现代的陆坡一带出现高的热流，显然与基底隆起带有关，因此闽、粤地区的大陆边缘是一种不活动的大陆边缘。由于洋壳的扩张，使大陆一侧的小得多断裂发生复活，并使得这些北东向断层的西北盘向西南相对滑动。由于沿着复活的断层压力骤减，有利于上地幔物质局部熔融而形成岩浆，喷出拉斑玄武岩。在断裂加深过程中，喷出的岩浆碱质增加，形成碱性玄武岩。

台湾北部的大屯火山群属琉球弧的雾岛火山带的西南端，当太平洋板块下插时，在火山带就出现钙碱性的安山岩。

将中国西南火山岩的化学分析资料投影在同样的图（4—7）上就可以看出，其岩石类型与中国东部相比要复杂得多。它既有玄武岩，又有安山岩，也有流纹岩。西藏南部，从白垩纪到古近纪，可能就像今天的南美洲安第斯山脉一样，是一个活动的大陆边缘。古地中海洋壳向北俯冲到亚洲大陆之下，俯冲板块局部熔融，在亚洲大陆南缘出现许多中性到酸性的火山岩，属于钙碱系列的高铝玄武岩系列的安山岩和流纹岩。但是在始新世—渐新世时期，两个陆壳相撞之后，这里的火山就偃旗息鼓了。当然，这并不意味着在西藏南部就没有岩浆活动。因为在两个陆壳相撞之后，南部的陆壳不能继续往北下插，在印度板块北侧的陆壳之内就可能出现许多向南推挤的逆掩断层，即所谓薄皮构造。由于相互摩擦，陆壳发生重熔，形成花岗岩浆。但是在强大的挤压力作用下，岩浆不能喷出到地表，而只能形成许多中、上新世的小的花岗岩侵入体。同时，在西藏高原的北部，上新世以来的火山活动则相当活跃，此起彼伏、断断续续一直持续到现在。这些火山是由于西藏高原在南部的挤压力作用下，又受到北边坚硬的塔里木地块的阻挡，使得高原北部一些老的断裂复活，故而上地幔发生局部熔融，形成岩浆，沿断裂上溢。在强大的挤压力作用下，与地壳发生混染，形成高钾的碱性安山岩。

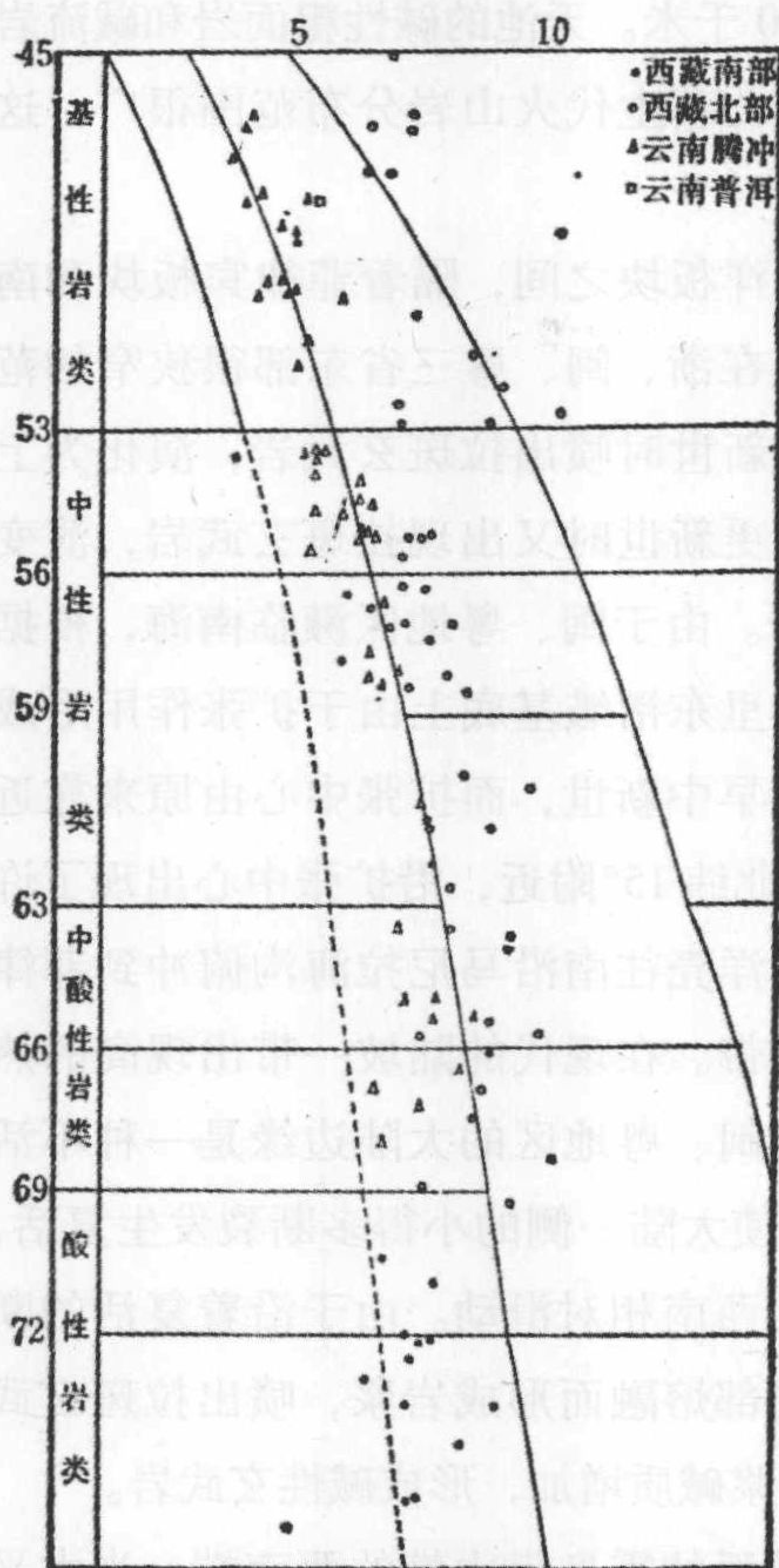


图 4—7　中国西部新生代火山岩岩石化学投影

当印度板块从南往北运移时，云南和我国的邻国缅甸，没有受到来自南面的正面的挤

压力，而是处在它的侧翼。因此，在古近纪时没有洋壳下插到缅甸之下，也就不可能出现古近纪的火山。到新近纪时，沿缅甸中央谷地发生了张裂，出现了上新世火山活动。腾冲在缅甸中央谷地的东北支的北端，因此，也出现了强烈的火山活动。但是由于腾冲远离碰撞带，所以从地幔来的岩浆是含钾稍高的微碱性玄武岩。在早更新世时，当岩浆处于挤压的条件下，与地壳发生混染，就形成含钾稍高的钙碱性安山岩和英安岩。

因此，中国新生代火山的发育以及火山岩类型的差别，均受到中国的地质构造的控制。

第五章

火山览胜

一　带水龙湾的龙岗火山群

一提起长白山，人们总想到它的主峰白头山，认为那才是天经地义的火山。的确，白头山以它高达2 744米的奇峰，险峻陡立，直插云霄，堪称千峰之秀。然而，人们绝不要忘记长白千峰之中的靖宇县和辉南县境的龙岗火山群，它有160多个火山锥，像众星捧月一样，把皑皑白雪的白头山衬托得更为美丽。

龙岗火山群一般在海拔800米左右，它的地理坐标为北纬42°07′～42°34′、东经126°10′～127°，形成一个东西延伸的狭长的火山带，其东西长达70千米，南北宽为20千米，总面积约1 400平方千米（图5—1）。登高远眺，带内火山口星罗棋布，火山锥群峰突兀，形态各异，有的呈截头圆锥状，有的呈太师椅状，有的呈坟丘状或半圆形孤山。积水成湖的火口湖，呈带水龙湾，别致新奇，湖水碧波荡漾。火口垣绿树成荫，风光秀丽，景色宜人，使人流连忘返。

龙岗火山群中的火山喷出物历历在目，期次清晰可见。自新生代以来，先后达7次。

最早的一次喷发是在上新世，喷出的是玄武岩，命名为船底山玄

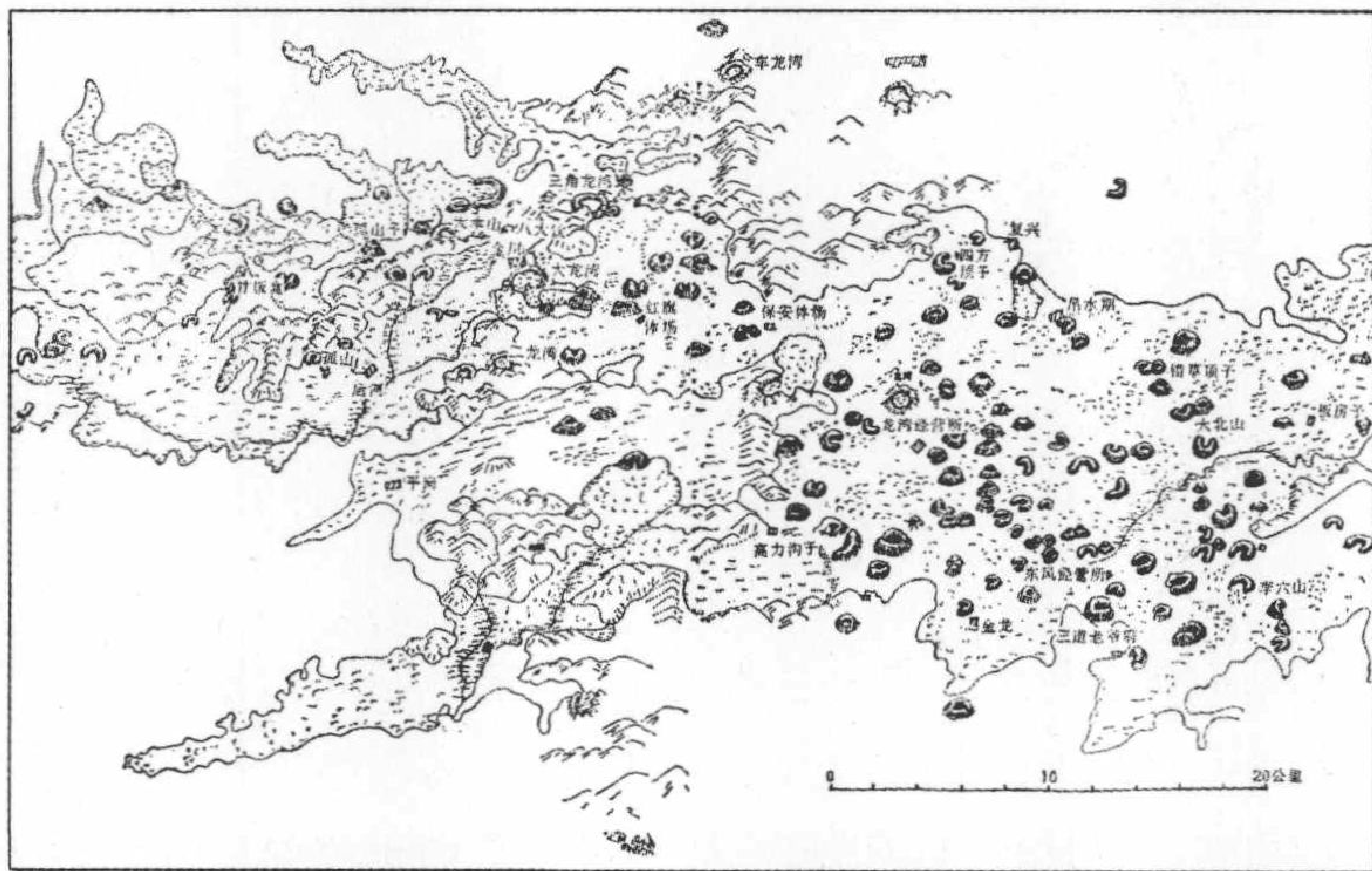


图5—1　吉林省靖宇县龙岗火山群地貌景观图（据吉林省区域地质测量大队，1979）

武岩。为灰黑色致密块状、板状橄榄玄武岩，最厚的地方可达600米。它构成明显的桌状山，没有见到火山口和火山锥，出露于火山区周围海拔为900～1 250米的高地上。

第二次喷发是在早更新世早期。它为多气孔的玄武岩，厚度比较小，只有80米，它们分布的高程要比船底山玄武岩低，一般为海拔700～900米。这是由于船底山玄武岩喷出以后，地壳曾相应上升，然后在一些低洼处又喷出巴厘玄武岩。

第三次在早更新世晚期，喷出的为小椅山玄武岩。它们组成了龙岗火山群的玄武岩台地。出露标高一般为330～660米左右，东南高，西北低。它们分布在一层冰水沉积层的上面，为一套灰色致密的块状橄榄玄武岩，并以柱状节理特别发育为特征。它们的上面覆盖有一层老黄土。

第四次喷发是在前一次喷出的玄武岩台地上出现了一个个火山锥。这些火山锥均由火山熔渣块组成，所以是熔渣锥。在熔渣中间偶尔夹有少量薄层的熔岩，熔渣层的厚度最大可达200米。经历这一次喷发之后，龙岗地区普遍处于暂时的宁静阶段，并在整个地区又堆积了一层10米厚的黄土，为了与下面的老黄土区别，人们称它为“上老黄土”。

到了晚更新世，龙岗火山区的东部又喷出一层玄武质火山渣。但厚度很小，一般不超过2米，叫做新开岭火山渣层，这是龙岗火山区的第五次喷发。

全新世时，龙岗火山群又活跃起来。开始喷出的火山碎屑物叫做四海火山渣层，为玄武岩质的火山渣，底部夹有团粒状的黑色土壤。在1977年从红旗林场的黑色土壤中曾见到碳化的木头，用^{14}C法测得的年龄距今不到200年，因此火山渣是在清朝乾隆年间—嘉庆年间喷出的。

龙岗地区最后一次喷发的是钢灰色玄武岩，它们的分布较广。当岩流从火山口喷出沿斜坡下泻时，常受前缘已凝固的岩石阻挡，形成火山熔岩穹丘。有时流出的岩流充填于中更新世晚期的火山所形成的沟谷或洼地中；有时可看见岩流从火山口数次溢出，层层叠盖，如从

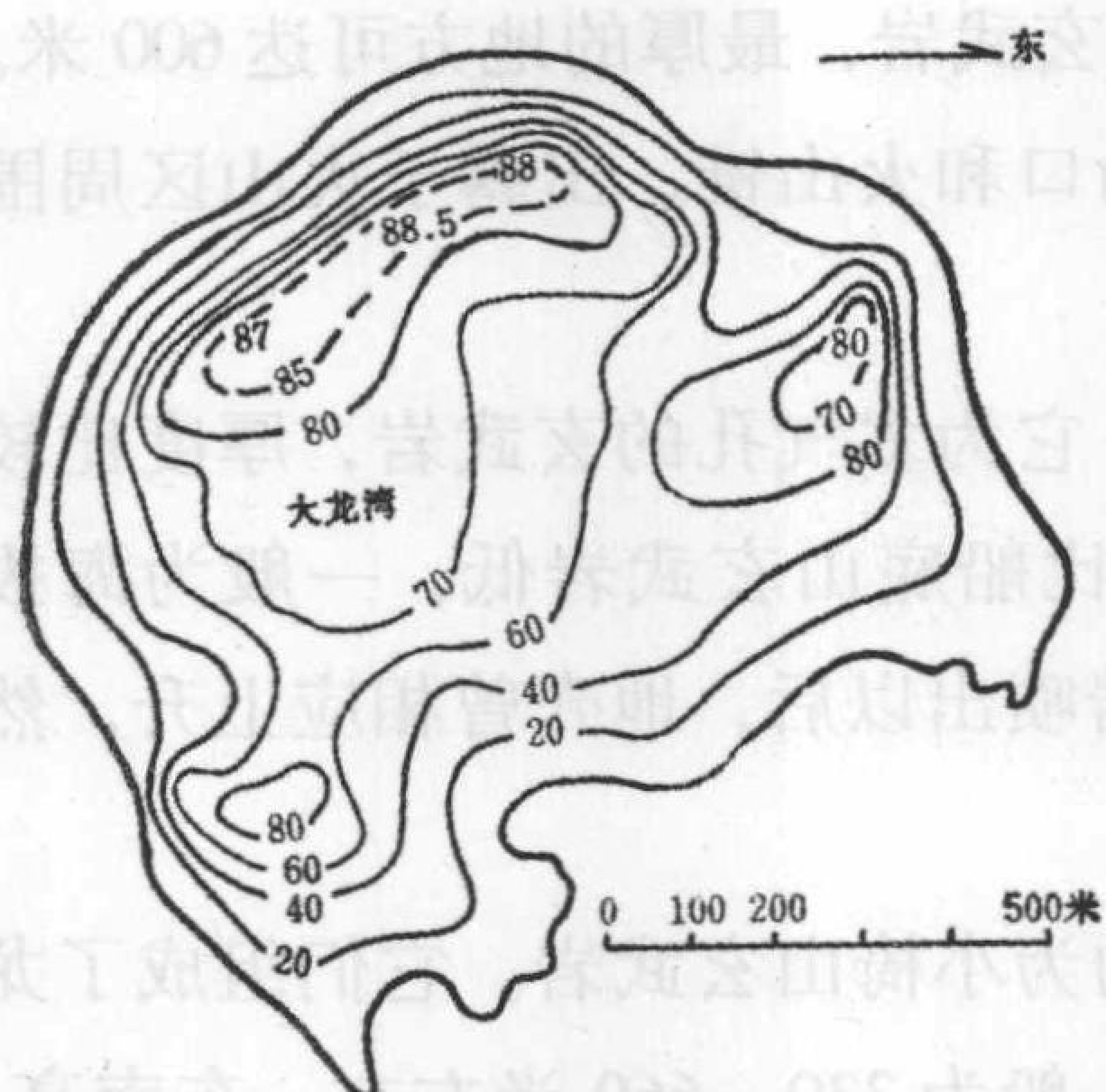


图5—2 大龙湾火口湖等深线图（吉林省区域地质大队，1979）

更新世形成的大椅山火山口中，就有三次年轻的熔岩流出，但规模一次比一次小。

从龙岗火山群火山锥的分布来看，总体来说是东西向的，但仔细看来，又以北东—南西向的排列最为明显。站在平岗从西北往东北眺望，小龙湾、二龙湾、大龙湾、三角龙湾、南龙湾和东龙湾这6个火口湖，以五六千米的相等间距，呈北东—南西向排列，犹似绿色林海的翡翠盘中的一串明珠。而圆宝顶子、二龙湾、金川西火口、大瓮山、孤山子、哈拉子南北的火口又呈北西—南东向排列。在龙湾经营所的东侧和火山区的东端的李六山一带，又可见到一些火山锥似乎呈南北向排列。然而，相比之下，仍以北东方向最为主要。根据大龙湾火口湖的等深线图（图5—2），在火口湖的西北部和东南部，各有一条北东向深沟，这说明大龙湾火口的喷发受着北东向断裂的控制，这些深沟可能是火山喷发的通道。而火山喷发时的高压气体将通道周围的岩石击碎并冲出，形成两条深沟。但是，东南部的凹陷并不连续，那是由于最晚期喷出的金龙顶子玄武岩从东南流来时，冲破了大龙湾火口垣的东南部，流到湖中把凹陷隔断为二的。经研究还发现，红旗林场一带有6个火山锥，呈北东向排列。最后一次从火山锥中喷出的物质是火山渣。在这6个火山锥附近，火山渣的厚度最大，可以达数十米至近百米；朝东南方向，火山渣的厚度逐渐变薄，到20千米之遥的四海一带，火山渣就只有几厘米厚了；从火山渣往西北，火山灰的厚度则迅速变薄，而且分布范围很窄。因此，这层火山渣形成了以6个火山锥为轴心，向两侧不对称分布的情况，这说明火山渣的喷发是受北东向断层的控制，而不对称的分布，很可能是喷发时正刮着西北风呢！

从龙岗火山群的火山锥的排列可以看出，火山的喷发显然是受着地质构造的控制。火山群所在的地区东西构造比较古老，但中、新生

代又有所活动。由于南北方向的挤压，形成了北东和北西向两组扭性断裂，其中又以北东向最为发育。在南北向的挤压中，有的地方出现较短的南北向张裂。因此，火山锥的方向总体是东西向的，而火山锥体的排列又是北东向与北西向的，其中又以北东向最为明显，只在个别地方可见到南北向的。

二　沿着徐霞客的足迹探腾冲火山

如果你感到龙岗火山群虽然火山锥多，但千篇一律，岩类单调，那么你不妨去走访我国西南一些火山。当然，西藏高原万里迢迢，没有强大的后勤保障，的确无法跻身于渺无人迹的莽莽昆仑或可可西里。如果你改变航向飞向春城昆明，只再需一个钟头的继续向西飞行，就可以到达西陲重镇腾冲。你可知道那可是明末大旅行家徐霞客经过千辛万苦才到达的地方。

腾冲火山的分布面积近1 000平方千米（图5—3）。最早喷出的是上新世玄武岩和安山岩。它们主要分布于高黎贡山西麓的龙川江流域。而早更新世的安山岩和英安岩的喷出规模最大，它们组成腾冲盆地东侧的高山和腾冲县境南部的山地。早更新世及上新世的火山覆盖面积为700平方千米，流出熔岩量约50立方千米。到中更新世时，火山活动规模较小，主要有4个玄武岩质盾状火山，其总面积约40平方千米，流出熔岩量为5立方千米。晚更新世时火山活动又比较活跃起来，喷发以安山玄武岩为主，腾冲火山群20余个火山锥都是在这时先后喷出的，其总面积约190平方千米，流出的熔岩流总体积为6立方千米。到全新世早期个别火山也喷发过。

如果你欲一览腾冲火山，登上城南松林叠翠的来凤山顶，往北看去，龙褷、打鹰遥相对应；往东望去，腾冲盆地的东缘，一条南北向的山脉从平地拔起；往南，则是丘陵起伏，层层叠叠，一望无际；在来凤山的西侧，俯瞰侨乡和顺盆地，一片黑黑的岩石，上面崛起马鞍状的火山锥，堵住了盆地的西口。脚下的来凤山，本身也是一座火山，而山上的岩石却南北截然不同。北部的为早更新世喷出的浅色英安岩；

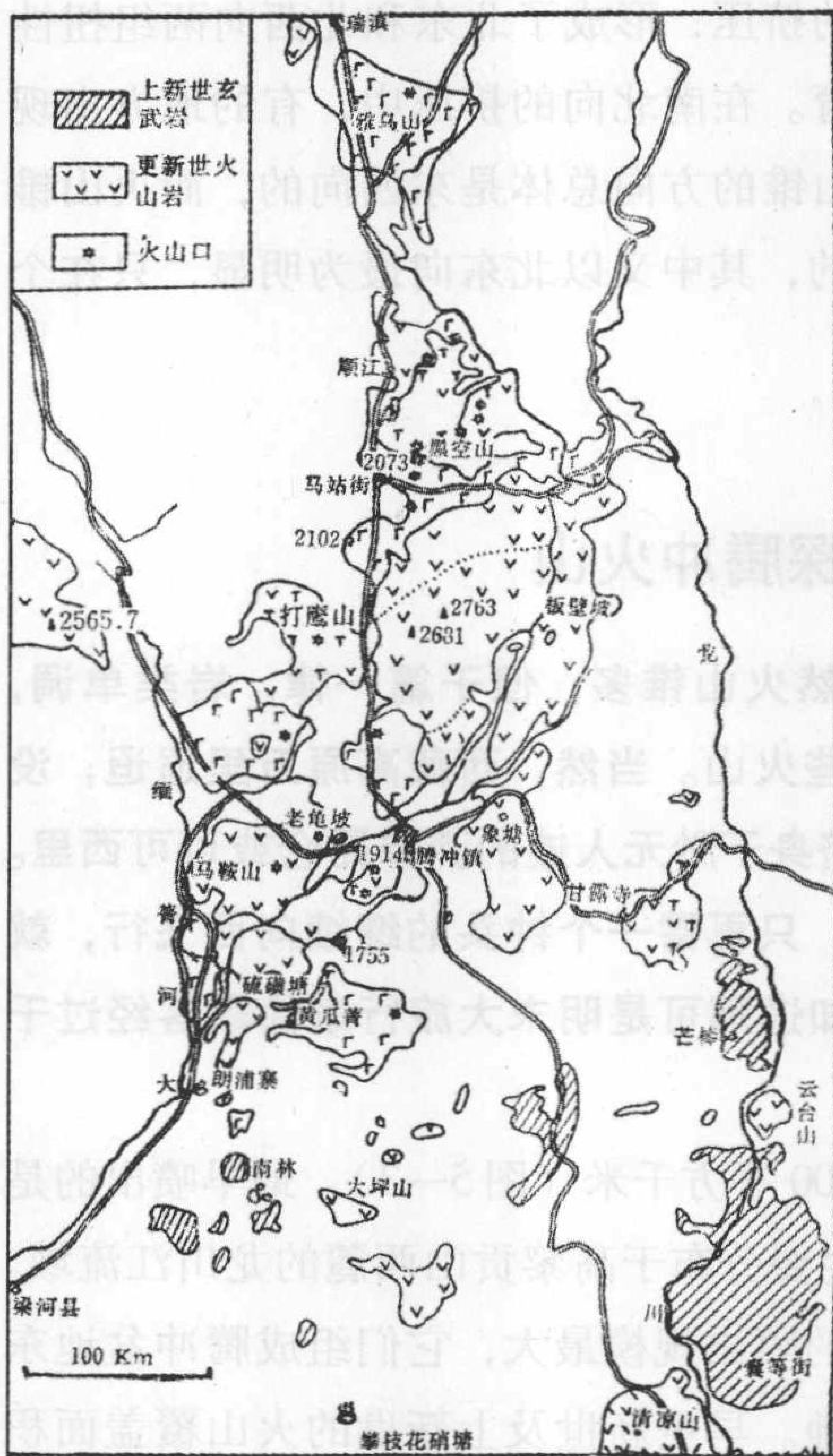


图5—3 腾冲新生代火山分布图

南部为30万年前中更新世晚期喷出的安山玄武岩，并有一个火山口，火口垣的缺口朝南。

从腾冲往北去，这是考察腾冲火山最精彩的路线。在腾冲盆地北侧是一个低矮的盾状火山，叫做马耳山，它是由38万年前中更新世喷出的玄武岩组成的。火山口位于火山的北端，熔岩向南流入腾冲盆地，在盆地北缘的陈家巷可见到它们盖在84万年前喷出的早更新世英安岩之上，英安岩的表部尚可见2~3厘米厚的烘烤层。沿着腾固公路翻过低平的马耳山，就是侍郎坝水库。水库之北为著名的打鹰山。打鹰山又名集鹰山，海拔2 614.5米，主体由晚更新世玄武岩组成，岩石多气孔，多为笛管状。1639年4月21日，徐霞客曾游打鹰山，对火山口的形状曾作了极翔实描述："其山脉北自冠子坪南耸，从顶上分二岐。一峙西南，一峙东北。二峰之支，如抱臂前环，西南下者，当壑右而伏，过中复起小阜而为中案，南坠而下，复起一峰为前案；东北下者，当壑左而伏，结为东洼之鈅。两峰坳处，正其环窩处，前蹲一峰当窩中；其脉复自东北峰降而中度，宛如一珠之托盘中，其前复起两小阜，如二乳之列于胸。其脉即自中蹲之峰，从左度右，又从右起度，而复起一阜于中，与双乳又成鼎足，前列为中峰近案，即南与中案并峙。稍度而东，又起一阜，即北与东洼之鈅对夹。故两乳之前，左右俱有洼中坳，中峰之后，左右亦有峡

中肩，其脉若甚平，而一起一伏，隐然可寻。”徐霞客对山顶火山口垣的浮岩作了生动的描述：“山顶之石，色赭赤而质轻浮，状如蜂房，为浮沫结成者，虽大至合抱，而两指可携，然其质仍坚，真劫灰之余也。”徐霞客还写道：“土人言：三十年前，其上皆大木巨竹，蒙蔽无隙中有龙潭四，深莫能测，足声至则涌波而起，人莫敢近；后有牧羊者，一雷而震羊五六百及牧者数人，连日夜火，大树深篁，燎无孑遗，而潭亦成陆。今山下有出水之穴，俱从山根分逗云。”古往今来，许多文人学士，皆据《徐霞客游记》中的这一段叙述推测打鹰山的喷发当在明万历三十七年。现据岩石的钾氩稀释法测得的年龄结果，最老不过20万年前，最年轻也达6万年前之遥。《永昌府文征》中“腾郡多火山，志载明成化、正德、嘉靖、万历年间火山爆发多次”，实为人云亦云的无稽之谈罢了。

由打鹰山往北约十余千米，即到达马站。在其东侧有许多截头圆锥状火山，自南而北一字排开，它们是龙虎山、箐坡、小空山、大空山和黑空山。在此一带火山的东北还有焦山等3个火山锥，更北还有大、小团山。火山锥体均不甚高，最低的箐坡高仅20米，最高的黑空山为220米。锥体直径最大为750米。锥顶均有火山口，形状各异，火口深可达60余米。此群火山明显分为两期，以黑空山最为年轻，流出的熔岩表层构造依稀可见，并掩盖了其他火山的熔岩被。黑空山为安山粗面岩，喷出年代5万年~6万年前，当在晚更新世，但是1993年测得火山口内一个巨型火山弹的钾氩年龄为7000年，说明它在全新世早期喷发过。较老的焦山为20万年前晚更新世早期喷出而成。由马站往北，达顺江，其附近有龙潭数个，一泓清水，潭径达120米，很可能是潜水水气爆炸留下的小火口。1639年4月22日徐霞客由打鹰山北行，途径马站，曾云：“其北山坡杂沓，石齿高下。”形象地绘出黑空山喷出的翻花熔岩之上，行路之难。但徐霞客对马站各空山未加任何描述，可见当时他对火山是相见而不相识了。穿过这片火山，到达固东。向北眺望，鸦乌山耸立于北。火山呈盾状，有一低平火山锥，锥体近圆形。火山口清楚，火口垣裂口朝南，可能它也是中更新世喷出，熔岩流表面已强烈风化。鸦乌山的西北麓就是著名的瑞滇热田，溢孔

不下百个，其热如沸。

在打鹰山东侧，与之遥相对应的是龙䆗山。它高出周围所有山峰，也是火山，但没有火山口。岩石类型为致密的安山岩，喷出的时代为距今50万年到100万年前之间，为早更新世喷出的。在该山之东，见澄波汇山麓，即上干峨青海，有村庐当海子北岸，竹径扶疏，见层峦环其后，澄泽映其前，有人疑为火口湖，其实并非如此。又回到腾冲盆地东侧的球牟山，山顶的象塘是否火口湖也难下结论。再南，如果循腾龙公路南行，则达龙川江边，可见到370万年前喷出的清凉山火山和350万年前喷出的团山火山。这些上新世喷出的火山都是由安山岩组成，锥体高大，但无火口。

在腾冲城之西有腾冲八景之一，叫叠水河瀑布。1639年4月16日徐霞客曾到此一游。现将其书所记摘录如下："其水从左峡中透空平坠而下，崖深十余丈，三面环壁。水分三派飞腾，中阔丈五；左骈崖齐涌者，阔四尺；右嵌崖分趋者，阔尺五。盖中如帘，左如布，右如柱，势极雄壮，……但此崖更近而逼，从西崖绕南崖，平对而立，飞沫倒卷，屑玉腾珠，遥洒人衣面，白日间真如雨花雪片。……其水下坠成潭，嵌流峡底甚深，因下蹈之。……复上西崖，其南一峰高耸，凭空揖瀑，是龙光台，上建关帝庙"。形成瀑布的岩石是玄武岩，柱状节理发育，气孔很少。瀑布西北侧龙光台台基为花岗岩，东南侧的岩石为北来凤山的英安岩。两者束峡极紧，当马耳山玄武岩喷发时，由北而南流至古大盈江河谷，被堵于两山之间，形成现在的腾冲盆地。由于玄武岩坚硬，不易被河水淘蚀，形成瀑布。

离开叠水河瀑布，走上腾盈公路，只见在来凤山的西北麓为一采石场。开采的岩石肉红色的英安岩，"层理"清楚，岩石中的角闪石晶体构成的线理依稀可辨。从线理与"层理"的排列，均见岩层倾向山体之内，与前述熔岩穹丘的构造十分一致。

来凤山的西麓就是和顺盆地，盆地不大，在它的西南端就是马鞍山火山。在黝黑的玄武安山岩之上耸立着不高的火山锥，锥高仅100米。火口垣的裂口朝向西北，远观形似马鞍，火山锥内有三个火口，串成葫芦状。旁侧有一仅高30米的寄生锥，内也有一个火口。马鞍山

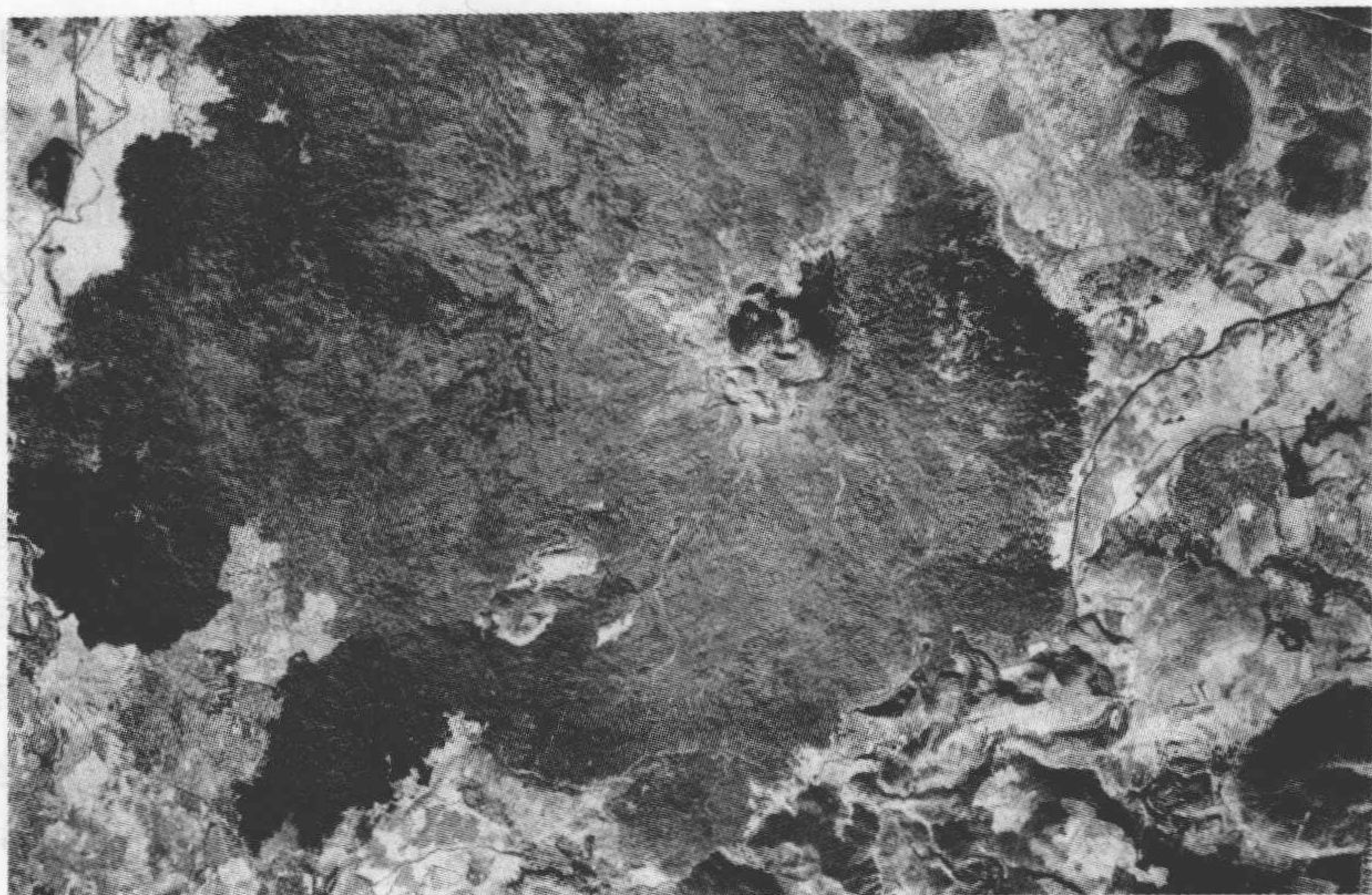


图 5—4 马鞍山火山锥和老龟坡火山锥的航空照片，右上角为老龟坡

岩石经年龄测定为 18 万年 ~ 7000 年前。流出的熔岩主要顺大盈江方向往西南流泻，也覆盖了北侧从老龟坡火山流出的玄武岩（图 5—4）。老龟坡位于和顺盆地北侧，是一典型的截头圆锥状火山。上有火口，深达 70 米。喷发时间约在 10 万年 ~ 20 万年前，属晚更新世。熔岩暗道特别发育，有著名的蝙蝠洞和景福洞等。顺腾盈公路绕过马鞍山，就到达马鞍山南部的肖压地区。这里是一片玄武岩台地。从肖压往东南，在大盈江边，可见到坝派巨泉；从肖压往西到邦老，必须下到缅箐河谷。在邦老桥的下流，可见到两层玄武岩，中夹河床相砾石层。两层熔岩可以一直往南可追溯到缅箐河汇入大盈江的朗烟一带，上层玄武岩为 40 万年前中更新世喷出物，而下层玄武岩则为 700 万年前的上新世喷出物。顺公路沿大盈江继续南行，在与梁河县交界处就是著名的朗蒲热水塘沸泉区。

腾冲之南，冈峦起伏，沟谷纵横，但是明显的火山不多。在深切的绮罗河谷，可见到左所营西部的火山基座，它坐落在燕山期花岗岩之上。火山底部有近半米的火山灰层，上覆块状熔岩，无气孔，柱状节理极为发育。往上的表部相为多气孔的含橄安山玄武岩，喷出时代也可能为晚更新世早期。继续南行就是著名的朱星街，东面为一较大的盾状火山，叫做东大坡头，火口在熔岩被的东部。当 50 万年前火山

喷发时，滚滚的熔岩向西流来，在朱星街附近分为南、北两支，分别注入北部的澡塘河和南面的沙坡河。澡塘河北侧是半个山，西南是西大坡头，它们的山体基部均为第三系砂砾岩，山顶都是早更新世安山岩。在澡塘河附近和南至沙坡河之间，有硫磺塘和黄瓜箐，构成著名的热海地热田。热田之内蒸腾之气，郁然勃发，声如虎吼，飞沫灼人，又别有一番景象。

通过对腾冲火山短暂的考察，你就会发现，此处自上新世始至全新世初，火山不断喷发，岩石类型多样，火山的形态有别。而且，与火山相伴的是，腾冲温泉特别多，仅一县之内就达58处。其中，还有规模颇大的热海、朗蒲热水塘和瑞滇等。那么，火山与温泉存在什么关系，你一定会十分关心吧！

第六章

火山与人

在人们的想象中，火山和地震总是灾难的代名词。火山喷发时，那熊熊烈焰和放炮般的轰鸣，给人以恐怖之感；那赤红滚滚的熔岩流，从山顶倾泻而下，横扫一个个的村庄，毁坏了一块块肥沃的农田；至于雨灰喷射时，是“正昼无见，风雨晦瞑”，人们分不清是生活在黑夜还是白天。然而在中国，活火山毕竟是寥寥可数，而且都远在边陲，它给人们带来的灾难都缺乏切身的体验。但是，在一些火山之国，火山带给人们的印象是刻骨铭心的。

公元62年2月5日，一次强烈的地震冲击着意大利西海岸，当时是罗马帝国时代，维苏威西侧的那不勒斯城还不存在。但在那不勒斯湾的海边，有一座庞培古城，它位于维苏威火山的南麓。当地的人们也知道维苏威是一座火山，但谁也没有把这次地震与火山活动联系起来。当地震发生时，庞培的人们并未特别地惊慌。因为意大利也是一个多震之国。半年之后，在8月24日，维苏威复活了，喷发持续了两天。结果庞培古城消失了，成千的人死于非命。当时维苏威的喷发主要是以火山灰和浮岩为主，而火山灰的覆盖面积达几百平方千米。庞培古城处于火山的下风，遭受的灾害最为巨大，城中的火山灰聚集的厚度达3米，只有一些较高的建筑物才能露出个尖顶儿。根据1595年



图6—1　公元79年维苏威火山喷发时埋葬在街上奔跑的庞培人（据P. Francis，1976）

开始并持续到后来的发掘结果判断，当时全城人口约为20 000人。在火山喷发之后，大多数人都离乡背井，而死亡的人大约2 000。其中，有些人是想留下来看看他们的房屋是否倒塌，一些人是留恋家园，而离家太迟，在路上被火山灰盖住了（图6—1）。从发掘结果看，直到喷发前的最后时刻，城市的正常交易在继续进行着；有的家中还摆着食物，准备就餐，受难者的尸体因火山灰迅速掩埋而未曾腐烂，后来的降雨使火山灰迅速胶结起来，形成了人的化石。看来，火山爆发之时，很多人藏在屋里，被火山灰压塌屋顶而致死；有的是由于浓烈的硫磺气味使他们窒息，有些人死时还用手捂着自己的鼻子和嘴巴，不希望闻到那难闻的气味；有些人在手中还握着钱袋、玉片或一些值钱的东西，看得出在死亡之前也不愿意舍弃它们。最可怜的是一条狗，它死了仍然被锁着，看来挣扎了很长一段时间，直到厚厚的火山灰聚集起来，而它的锁链太低，不允许它再能窜到火山灰层的上面。它死了，但痛苦地弓着背，脖子还拉得直直的。然而，这次两天的喷发，原来高高的火山锥被掀掉了一半（图6—2）。

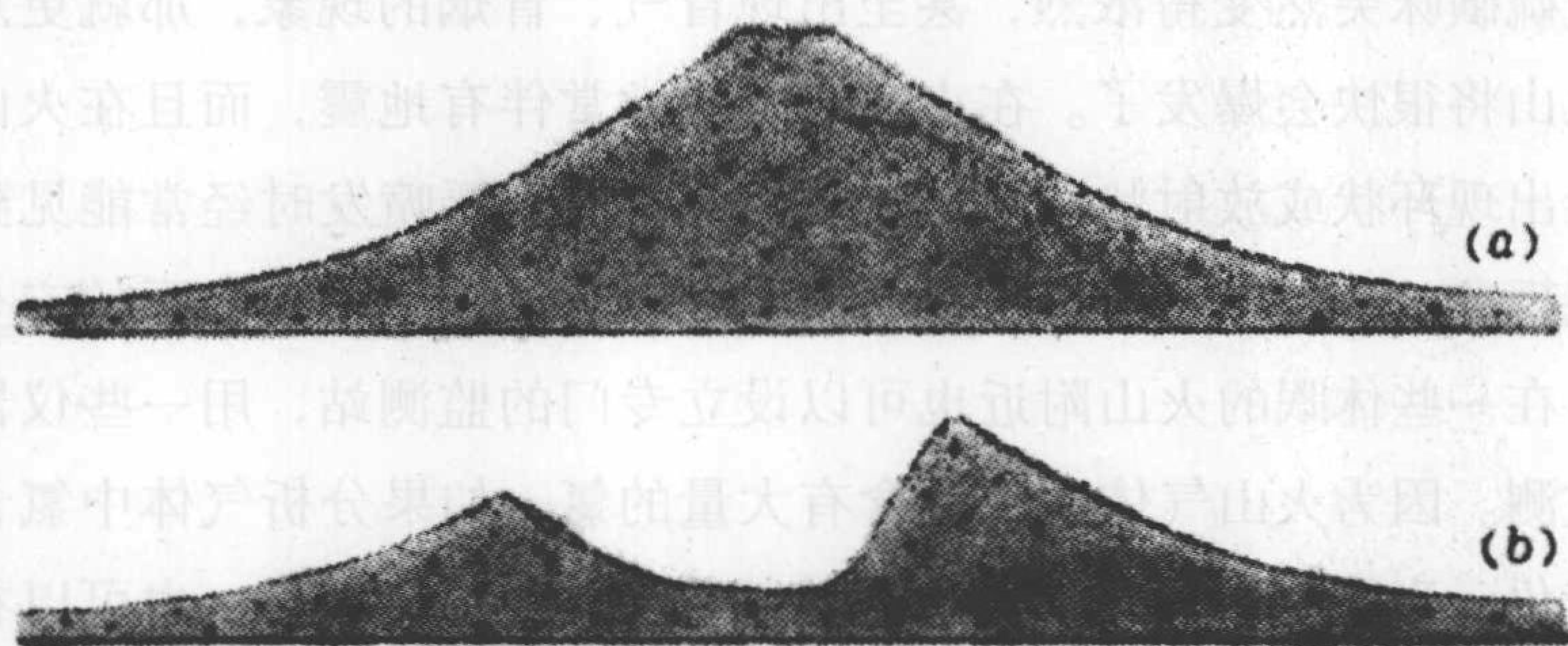


图6—2　公元79年维苏威火山喷发前和喷发后火山锥的外形（据P. Francis，1976）

有人统计过，自1500年以来，因火山喷发而致死的人数不超过25万。的确，火山的喷发与残酷的战争和刹那间的地震相比，带给人们的灾难毕竟是小得多。因为火山的灾害主要是局限于火山的周围。在一般情况下，一次火山喷出的熔岩只有几平方千米。唯一的例外是1783年6月开始的一次冰岛火山爆发，其喷出的时间持续了两年之久，流出的熔岩达12立方千米，使得岛上20%的居民、80%的羊和一半以

上的牛马都死亡。但是，像这样规模的喷发，有史以来也就是一次。一般来说，火山喷出物中，熔岩的数量是比较少的，大量喷出的是火山碎屑物。1815 年印度尼西亚的汤波拉火山喷出的碎屑物为 100 立方千米，它是 1883 年著名的喀拉喀托火山喷出的碎屑物（18 立方千米）的五倍多。当火山碎屑物从火山口喷出时，与气体和水蒸气组成火山烟云，直冲数千米高空，散布到几百、几千千米以外，所掩盖的面积要比熔岩覆盖的面积大得多，因此所带来的灾难也大得多。前面说过，庞培古城的覆灭并非由于熔岩的掩埋，而是被火山灰所埋葬。

由于火山给人们带来巨大的灾难，因此，住在火山附近的人们常常担心自己眼前的火山什么时候会苏醒而重新爆发，也总盼望着能有预报的方法。其实，火山和地震一样，在它爆发之前，在火山附近总会有一些特殊的现象。如果火山顶像长白山的白头山一样的高大，常年积雪，爆发前山顶的积雪会很快地融化，火山附近的森林会突然死亡，火山附近的温泉温度可能会迅速升高，这些现象都是由于地下高温岩浆向上运移到地表，使地表大幅度增温造成的。如果嗅到火山口附近硫磺味突然变得浓烈，甚至出现冒气、冒烟的现象，那就更意味着火山将很快会爆发了。在火山喷发时常常伴有地震，而且在火山周围会出现环状或放射状裂隙。这些都是火山将要喷发时经常能见到的宏观现象。一旦发现，就要密切监视火山的活动，采取必要的安全措施。在一些休眠的火山附近也可以设立专门的监测站，用一些仪器进行监测。因为火山气体中通常含有大量的氯，如果分析气体中氯含量的变化，当氯含量大量增加时，则意味着火山将会喷发；也可以在火山附近安置地震仪，监视火山引起的地震，火山地震与一般的构造地震在波形特征上是不同的，易于识别出来。在监测站也可以设置磁力仪，监测地磁的变化。因为岩浆是高温的物质，如果一种物质温度高于 600℃就会发生退磁作用，因此，岩浆是无磁性的。当高温无磁性的岩浆向地表上升运移时，必然会对地磁场产生极大的干扰。因此，可以告慰火山区附近的人们，火山的爆发是可以预测的。

我们不应该、也不必害怕火山。而且我们应该认识到，火山像许多事物一样，无不具有两重性，一方面，它可以给人类带来巨大的灾

难，另一方面又造福于人民。例如，处于岛弧带的印度尼西亚，它的人口众多，超过1.5亿，居世界第五位。而有人研究过印度尼西亚的人口密度图，发现人口密度最大的地区也是在火山中心附近，是印度尼西亚人不怕火山吗？不是，因为火山喷出的碎屑物在气候炎热的印度尼西亚极易风化，火山灰中的钾分解出来的是天然的钾肥。另外，印度尼西亚地处热带，那里的狂风暴雨冲刷着大地，易于使土地变得贫瘠，而降下的火山灰带来的钾肥也缓解了这一矛盾。因此印度尼西亚火山区土地肥沃，农作物产量高，能供给众多人口粮食。再如印度德干高原喷出的大面积高原玄武岩，已经风化成黑土，是印度最重要的植棉区。

火山区也是一种旅游资源，因为那里有山有水，湖光山色，绚烂艳丽，常常成为天然公园。世界上一些著名的天然公园就是火山地热区。如美国的黄石公园、新西兰的汤加罗国立公园、日本九州岛上的阿苏火山。1980年，我国在黑龙江省五大连池建立了第一个火山自然保护区，在那里可以看到由14座火山和5个堰塞湖组成的独特的火山自然景观。在1961年建立的长白山自然保护区，虽然是以温带山地森林生态系统和自然景观为主要保护对象，但风光秀丽的火山，山水如画的天池，奇峰异谷，银河倒挂，温泉淙淙，热气升腾，松花江的源流奔腾咆哮，茫茫林海，郁郁葱葱，多引人注目。每年7月中旬至8月下旬，长白山成了国内外游人进行科学考察、采风和游览的最佳场所。

在火山区常常还有许多丰富的矿产，最重要的是金、银、铜等。在自然界中，金的含量是十分稀少的，只有0.004ppm。火山活动是使它们富集起来的一种方法。有人把过去6000万年内才形成的金矿点画在一张图上，发现它们的分布恰恰是与环太平洋的火山带一致，也就是说同前面讲的“环太平洋火环”一致。与火山作用有关的另一类矿产是铜矿，在美国和南美的西海岸，有一条狭窄的重要铜矿带，称为斑岩铜矿带（图6—3）。此带与太平洋火环平行。它与较老的侵入体有关，但是严格地平行于火山带。这些铜矿都是含铜很富的块状矿石，而不是均匀矿化的含矿岩石，其含铜量达1%~2%。生成原因是由于

含铜的洋壳俯冲到美洲大陆之下，它们被熔融，并形成侵入体上升到地下深处，通过热水溶液的作用，使铜进一步富集，形成富铜的侵入体，然后被剥露出来。而现代的火山区位于类似的含铜侵入体的顶部，但是它们最终也会被剥露出来。目前，世界上最大的铜矿区有4个：美国西南部、南美安第斯山、加拿大地盾和中非。前两个均与斑岩铜矿有关。我国是一个缺铜的国家，这主要是地质工作做得还不够。而西藏的冈底斯山脉在地质构造上与安第斯山脉很相似，可能在那里会找到斑岩铜矿。另外，目前中国很重要的铜矿产地在甘肃省白银厂，那也是一种与火山活动关系密切的矿产，只不过那里的火山活动是古生代时在祁连山地槽中发生的，喷出的熔岩是海底喷发的细碧角斑岩，是一种绿色和灰绿色含钠高的海底玄武岩。

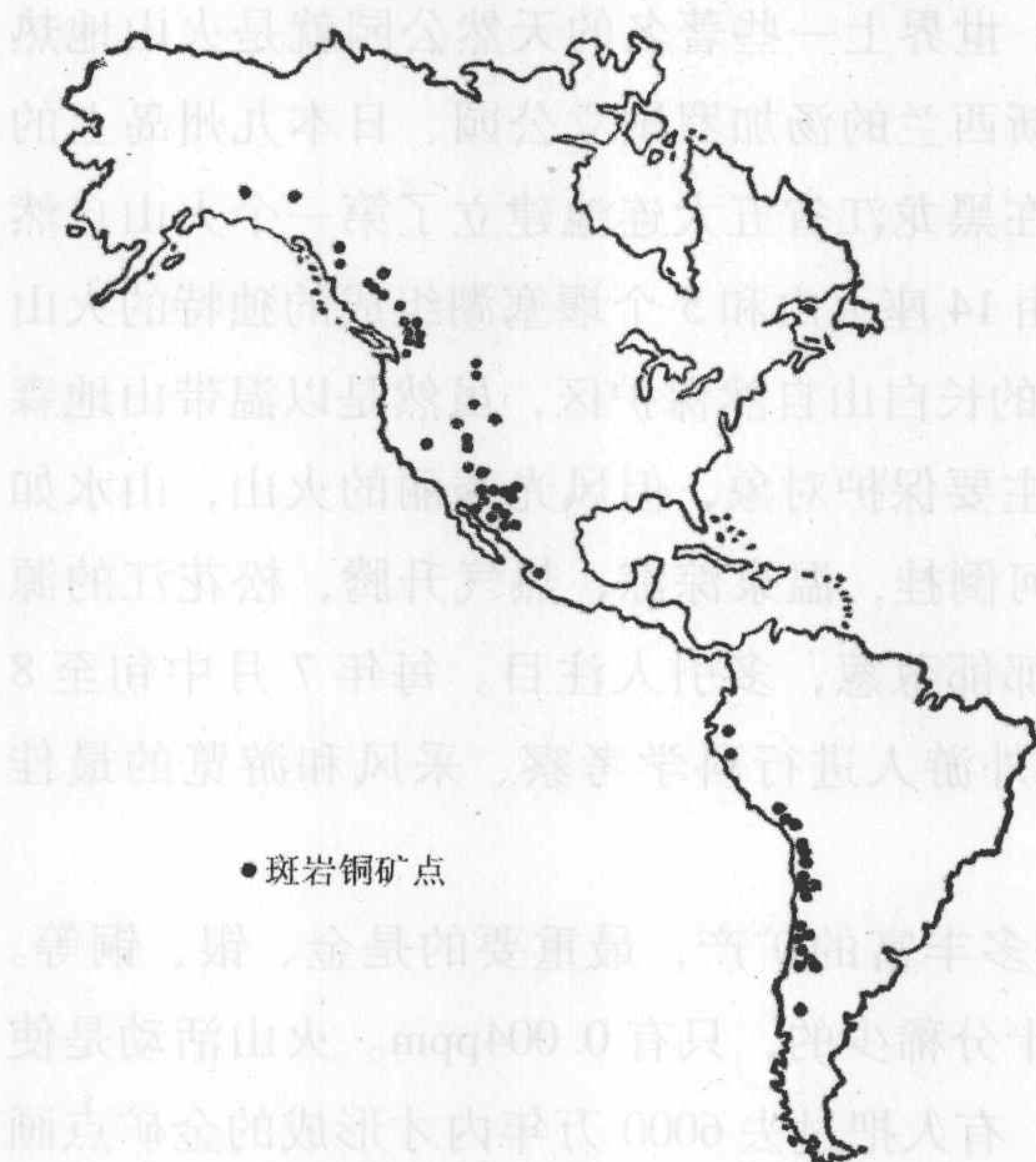


图6—3 美洲西海岸的斑岩铜矿点（据 P. Francis，1976）

火山岩也是一种重要的建筑材料。致密安山岩因含 SiO_2 量较高，故是良好的天然耐酸材料。流纹质凝灰岩可作抗硫酸盐水泥的混合材料；蚀变后的流纹岩可作石油工业和油脂工业的漂白剂。一部分耐酸的粗面岩，可制成化学工业的耐酸器皿；粗面凝灰岩可作抗硫酸盐水泥的混合材料。玄武岩因分布广，在建材上的用处最大。以玄武岩作为主要原料，另加入部分生石灰和少量石膏，不经煅烧，混合球磨可制成石灰火山岩无熟料水泥，它是一种水硬性胶结材料，它凝结快、强度早期低、后期高。火山岩外加一定数量的补助料（石灰石等），经高温熔化、蒸汽喷吹，制成火山岩绵，它是人工无机短纤维，是一种用途极广的保温材料。玄武岩还具有良好的浇

铸性，易于结晶，是铸石的良好材料。所谓铸石就是利用天然岩石经人工熔化后浇铸的石料，它抗压、抗磨和耐酸等性能远较天然岩石优越。此外，浮石和火山砾，具有坚固的海绵状结构，对发展轻质高强度建筑材料将发挥积极作用。

与火山活动最密切相关的是地热资源。火山区常有许多温泉，它们具有祛病强身之效，常成为人们休养生息之场所。有些温泉还能预示地下藏有丰富的地热能。经过详细的勘探，可以将它们开发出来直接利用于工农业生产或转换为电能，再为人们的生产和生活服务。有些火山地热区还藏有丰富的矿产资源，如硫磺、硼砂或热泉型金矿等。有关这方面的问题我们将在下面详细介绍。

第七章

温泉奇观

一 什么是温泉

现代活火山最大的特征之一是有大量的温泉，但是温泉并不是仅局限于火山区。在我们祖先留下的文海里，活火山的报道极少，但是有关温泉的报道极多，而且远胜于一般的冷泉，可能是因为温泉水是热的，并且有治疗疾病的功能。古代典籍中曾记述："神农尝百草之滋味，水泉的甘苦，令民知所避就，一日而遇七十毒。"《山海经》中也有温泉的记载。汉朝的张衡不仅是地震仪的发明者，还歌赋过温泉。他在所写的《温泉赋》中说："有疾疠兮，温泉汩焉；以流秽兮，蠲除苛慝"，说温泉可以治病。北魏郦道元所著的《水经注》还有饮温泉水治病的阐述。公元1000年，唐庚在《汤泉记》中探讨了温泉的成因。总之，在历代卷帙浩繁的历史文献和诗词歌赋中，为我们提供了关于温泉的异常丰富和生动传神的描述。那么，什么是温泉呢？

地表溢出的温泉，其温度差别极大。有的温泉涌沸，飞雾如烟；有的不热而温，适可着体；有的涌流如注，有的仅涓涓细流；有的热气升腾，臭不可闻；有的清澈晶莹，无色无味。但是不管怎样，它们都是从地下流出的温的地下水。到底这些地下水的温度有多高才能算温泉呢？天然排放的温泉的温度最高可以达到多少度呢？对于前一个问题的回答，各个国家的标准不一样，如德国和英国的标准是高于20℃，日本的标准则高于25℃，近年我国制定的标准也是25℃。这些数值并非严格的科学标准。其实，早在1875年，美国人吉尔佰特就对温泉下了一个科学的定义："凡温度高于当地年平均温度15 ℉的泉水，就叫做温泉或热泉。"也就是天然排放的泉水它的温度高于当地年平均温度8.3℃的泉就可以算作温泉，这可以说是温泉温度的下限。由于一个国家地形起伏变化很大，各地的年平均温度是不同的，所以各地温泉的下限温度也就不一样。在西藏北部年平均温度为0℃，那么只有8℃～9℃的泉水就可算是温泉。而北京的年平均温度是11.6℃，则20℃的泉才能算温泉。在华南广东年平均温度是21.8℃，泉水的温度只有达到30℃才能算温泉。所以，一个国家疆域不大，与地形起伏无甚变化，取一定的温度作全国的标准，那

是理所当然；而中国疆域巨大，地形复杂，取统一的温度标准却并不科学。如现在取25℃作为标准，在青藏高原可能很多微温泉（<25℃～10℃）就被排除于温泉之列，而在广东、海南和广西南部，一些冷泉（>25℃～30℃）就成为了温泉。

温泉的最高温度可达多少度呢？如果你读过一些有关温泉的资料。你会看到有人报道：台湾屏东温泉温度高达140℃；腾冲硫磺塘的大滚锅水温高达104℃；西藏唐古拉有100℃的温泉，等等。当你看到或听到这些内容时，你一定会感叹，那里温泉的温度是多么高啊！温泉的水都开了。但是我敢肯定地说这样的报道是失实的。为了判断这种说法是否正确，需要懂得一点热力学的知识。“水开了”在物理学上的概念叫“水沸腾了”。当烧开水时，我们就会看到，水被加热到一定温度，水中开始形成小气泡。由于汽的重度比水小，气泡就向上运动，在上升过程中，气泡逐渐变大，浮到水面后气泡破裂，蒸汽分子飞逸到周围空间里。沸腾是在液体内部进行气化的现象，也就是说水由液态变成气态。现在已经证明，沸腾只能在固定的温度下进行，发生沸腾时的温度叫沸点，达到沸点的水叫饱和水。在一个大气压力下，水的沸点是100℃。压力升高，沸点温度也升高；反之，压力下降，沸点温度也下降。在地表上，各个地区的压力是不一样的，一个地区的高程增加，大气压就下降，沸点就降低（图7—1）。在西藏高原某地区，如果海拔为4 000米，水到沸点就是87.5℃；海拔升到5 000米，沸点就下降到85℃。在云南腾冲县硫磺塘，海拔为1 600米，沸点温度为95℃。在地表压力一定的条件下，从地下排放出的水是对应于当地高程的饱和水。因此，它的温度一般不会超过当地的沸点。也就是说，在5 000米的西藏高原，温泉的最高温度为85℃。在1 600米的腾冲硫磺塘，温泉的最高温度为95℃，这时的温泉就可以叫做沸泉。当出现沸泉时，泉周就会有一些蒸汽出现。但这是含有饱和水的蒸汽，又叫湿蒸汽，其温度也不会超过饱和温度。有人把沸泉称为过热水泉，也是概念的错误，因为沸泉水并不是过热水，而是饱和水。有时由于大量蒸汽的出现，沸泉的温度可能略超过沸点，但最多仅超过1℃～2℃。有人报道腾冲硫磺塘大滚锅热水温度达104℃，这是难以令人相信的。

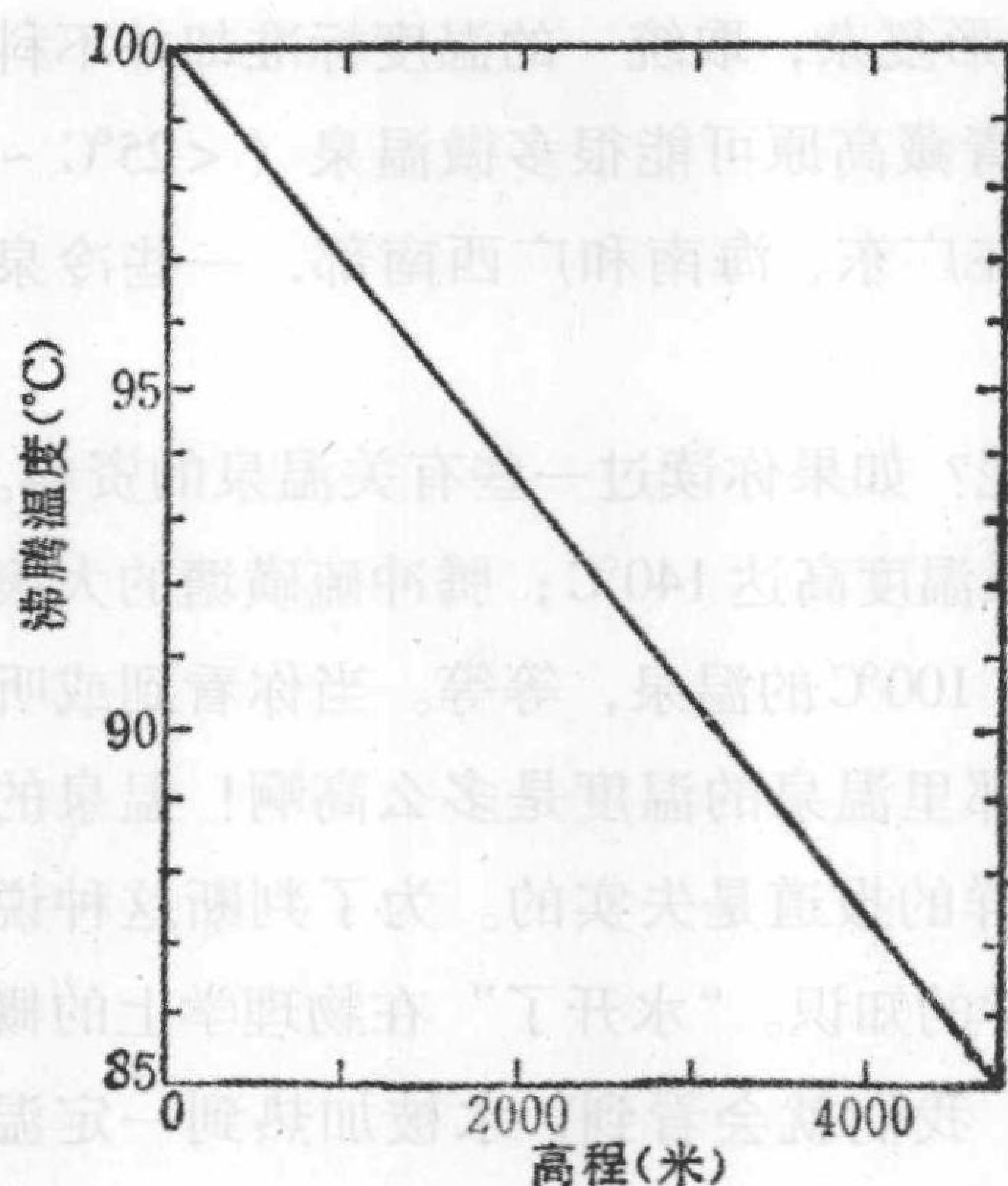


图 7—1 沸点与高程的关系

1973 年我们测得硫磺塘大滚锅的水温为 90℃，西北角喷水口的喉管深 1.5 米处水温为 96.6℃，仅超过当地沸点 1.6℃。产生这种差别的原因，一方面可能是因为测量仪器不精确（如高温下用酒精温度计测量，或读数不准确）。一方面可能是测温探头伸到喷气孔中较深的地方测得的读数，并不代表泉口的温度。根据上面的叙述，我们可以说温泉的最低温度要高于当地年平均温度 8℃；最高温度对应于当地高程的沸点，或略超过沸点 1℃~2℃。

有史以来，我国习惯于把温度高低差别很大的水泉都统一称为温泉（warm spring），而国外则叫热泉（thermal spring）。随着科学的发展，人们对自然界的认识逐渐加深，人们对温泉的开发利用也逐渐在扩大，因而需要对温泉进行科学分类。在人类历史的早期，人类对温泉的认识，只是根据它和周围环境冷热的比较，主要以人体感觉的比较，而有冷、温、热、烫之分。但是，不同的人对温度的感觉不同。如一些年轻人在 37℃的温泉中沐浴，颇感舒适；而老年人则颇有冰凉之感。因此，温、热之间的界线并不明显和严格。随着科学的发展，人们在对温泉的研究和利用过程中注意到了三条重要的温度界线，即当地年平均温度、地球的年平均最高温（35℃）和对应于当地高程的沸点温度。当泉水排放到地表时，其温度高于当地年平均温度 8℃，低于地球年平均最高温度 35℃，可以称为微温泉；当泉水温度高于 35℃，而低于 45℃时，可以叫做温泉；45℃可以作为温泉和热泉的界限，因为高于 45℃时，人类就不能直接在泉水中洗浴了，并且可以考虑将 45℃以上的热水直接用于生活设施和工农业生产。热泉的温度上限应该是略低于当地高程的沸点。温度达到沸点的泉应称为沸泉。如果沸泉排放时既溢出沸水又喷出蒸汽，

就可以叫做喷气孔。如果在一个地域没有泉眼，而是从地面溢出蒸汽，就称为放汽地面。沸泉、喷汽孔和放汽地面都是高温水热活动区。在那里常常会显现出许多有声有色的地热景观来。

二　沸泉集锦

中国沸泉为数不多，主要分布于西藏南部、云南西部、川西甘孜州以及台湾北部的大屯火山区及宜兰的清水、土场一带。在中国大陆内部，已知的沸泉仅见于青藏高原北缘，有青海省黄河南岸的贵德县扎仓寺、昆仑山布喀达坂峰东麓和西藏改则县高温泉（图7—2）。

沸泉以温度高、地热现象丰富而吸引着文人学士，因而有史以来给我们留下了大量的历史记录，它们已经成为研究地热区动态变化的宝贵资料。

明代的地理学家徐霞客于公元1638～1640年（明崇祯十一年至十三年）滇游期间曾考察了众多温泉。他在《滇游日记》中提及的温泉就有22处，其中着墨最多的是腾冲县硫磺塘，次为腾冲县瑞滇、洱源县九气台和滇东的安宁温泉。

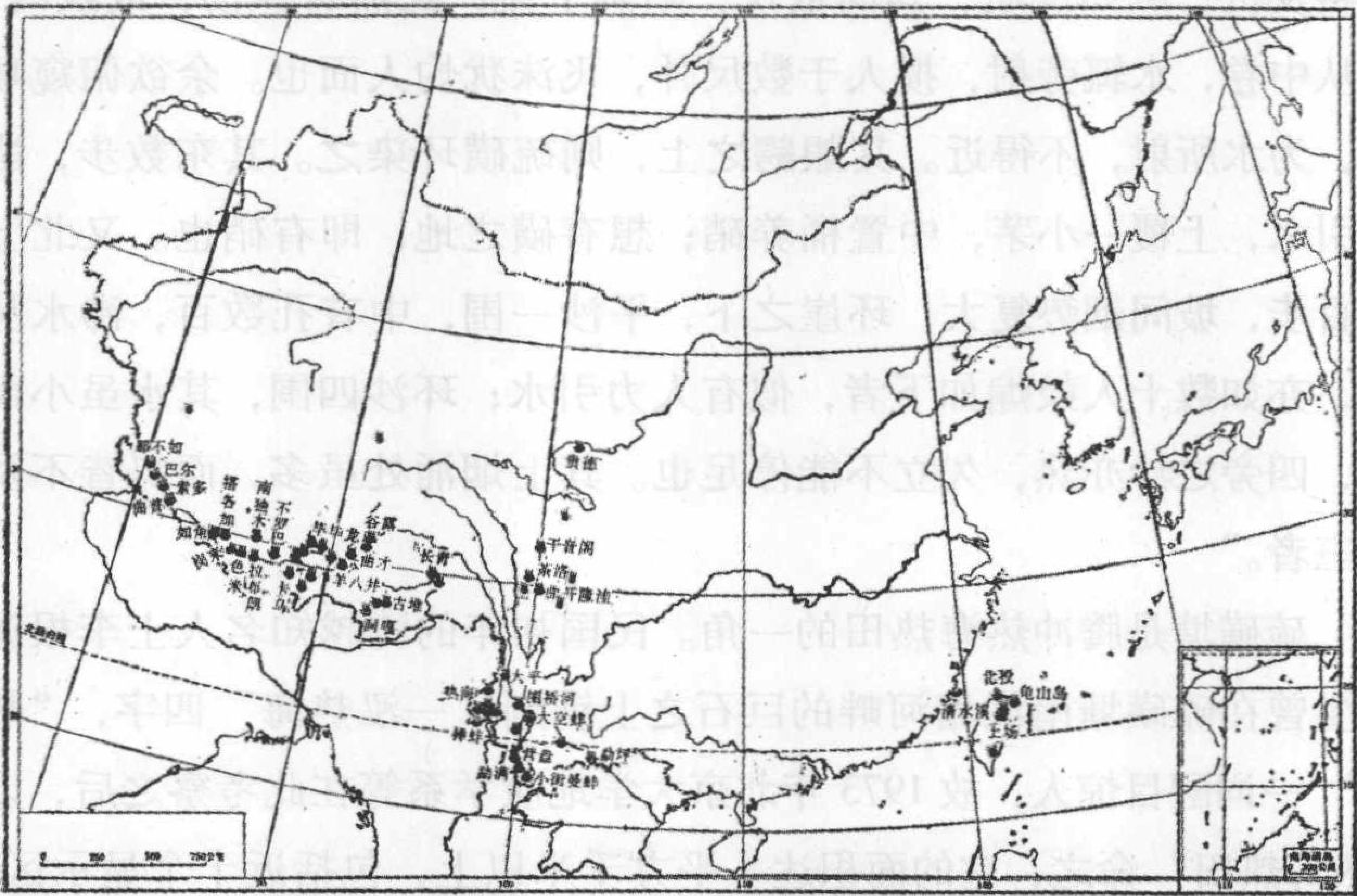


图7—2　中国沸泉分布图

1639年5月7日，淫雨霏霏，徐霞客冒雨考察硫磺塘，真实而生动地记述了那里的地热显示和水热活动的状况。徐霞客自清水朗（今日的朱星街）沿大溪（即澡塘河）西行至硫磺塘，登半个山而回绮罗，对硫磺塘作了如下的记述：“又西下半里，直抵溪上，有二塘在东崖之下，乃温水之小者。其北崖之下，是为硫磺塘村；有桥架溪上。余讯大塘之出硫磺处，土人指在南峡中。乃从桥南下流涉溪而西，随西山南行。时风雨大至，田塍滑隘，余踯躅行，半里得径。又南一里，则西山南进，有峡东注大溪；遥望峡中蒸腾之气，东西数处，郁然勃发，如浓烟卷雾，东濒大溪，西贯山峡。先趋其近溪烟势独大者，则一池大四五亩，中洼如釜，水贮于中，止及其半，其色乳白，从下沸腾，作滚涌之状，而势更厉；沸泡大于弹丸，百枚齐跃而有声，其中高且尺余，亦异观也，时雨势也甚大，持伞观其上，不敢以身试也。其东大溪，从南下环山南而西，合于大盈；西峡小溪从热池南，东注大溪。小溪流水中亦有气勃勃，而池中之水，则止而不流，与溪无与也。溯小溪西上，半里，坡间烟势更大，见石坡平突，东北开一穴，如仰口而张其上齶（图7—3），其中下绾如喉，水与汽从中喷出，如有炉橐鼓风煽焰于下，水一沸跃，一停伏，作呼吸状；跃出之势，风雨交迫，喷若发机，声如虎吼，其高数尺，坠涧下流，犹热若探汤；或跃时，风从中卷，水辄旁射，揽人于数尺外，飞沫犹灼人面也。余欲俯窥喉中，为水所射，不得近。其龃齶之上，则硫磺环染之。其东数步，凿池引水，上覆一小茅，中置桶养硝；想有磺之地，即有硝也。又北上坡百步，坡间烟势复大，环崖之下，平沙一围，中有孔数百，沸水丛跃，亦如数十人鼓煽如下者，似有人力引水；环沙四围，其水虽小而热，四旁之沙亦热，久立不能停足也。其上烟涌处虽多，而势皆不及此三者。”

硫磺塘是腾冲热海热田的一角。民国初年的腾越知名人士李根源先生曾在硫磺塘南澡塘河畔的巨石之上镌刻“一泓热海”四字，“热海”一词醒目惊人，故1973年北京大学地质学系等在此考察之后，以“热海热田”命之，它的面积达8平方千米以上，包括近十个显示区，以硫磺塘、澡塘河瀑布和黄瓜箐为最胜。徐霞客当年考察时因天不作



图 7—3　这就是 370 年前徐霞客考察硫磺塘时所描述的“蛤蟆嘴”，目前依然喷水如故

美，风雨交加，当进入澡塘河后可能迷失方向，以西作南，以北当西，整整转了 90°，直到硫磺塘村才更正过来。虽然他仅考察硫磺塘一隅，但窥其一点，可见一斑。目前峡中蒸腾之气，如浓烟卷雾之势，依然如故。但是，350 年来，硫磺塘一带的变化也相当惊人。当年“一池大四五亩”的沸水池已荡然无存，代之的是黄沙裸露热汽升腾的放汽地面。而“水汽从中喷出”的一穴，今日已不复存在，估计可能因为经历了一次强烈的水热爆炸而成为今日的大滚锅。据我们访问得知，硫磺塘大滚锅在 50 多年前喷水高度可达一人多高（约 1.7 米）；解放初期还有 1 米左右；如今仅有 0.5 米了。大滚锅的面积也日益缩小。但并不能说硫磺塘的地热活动已经衰竭。

在云南省有 20 多个沸泉，其中水热活动最为强烈的当推云县大控蚌。云县旧称云州，1949 年前是谈之色变的瘴疠之地。因此大控蚌的沸泉，除县志略带一笔之外，未见任何详尽的报道。大控蚌位于云县县城西南南桥河河谷中，距县城 15 千米，附近已建南桥河电站，有简易公路可通。南桥河在此段是沿南定河断裂发育的断层河。沸泉区位于河的右岸的高山峡谷中。当进入峡谷，两岸巉石，俱堆削如夹，只

闻虎吼之声，震耳欲聋。沿峡谷前行50米，在朦胧烟雾之中，见一悬崖壁立。在悬崖顶部，热水瀑布，坠空而下，故在悬崖之上，必不乏热泉，但需绕道数里方能攀登。在悬崖之下，虽未见沸泉腾溢，但见无数沸水柱，凌空而起，高达数米。在阳光之下，千花万蕊，喷成珠树。喷口温度高达96℃。崖下左侧是一斜坡，寸草不生，硫磺环染。陡壁之上，蚀变矿物长如白毛，茸茸可爱。沿着斜坡攀登，足陷半尺，有沸水溢出，虽脚穿雨靴，其热尤甚。大控蚌地热区还有数处热泉，所处地势甚高，其活动强度皆逊色于悬崖邻近。整个大控蚌地热区的面积仅一平方千米，地热活动的强度虽高于腾冲热海硫磺塘，但面积则不及。

台湾岛属于西太平洋岛弧带。台北大屯火山区附近的地热活动强烈，它沿北东向金山断层展布，长18千米，宽5千米，可划分出12~13个显示区。1669年（清康熙三十五年），郁永河到台湾采办硫磺，曾访问过北投附近的硫磺山，对那里的地热活动作了非常精彩的描述，其所著《裨海纪游》（又名《采硫日记》），脍炙人口，从清康熙以来多次刊刻。现节录如下："余问番人硫土所产，指茅庐后山麓间，……复越峻坂五、六，值大溪，溪广四五丈，水潺潺巉石间，与石皆作蓝靛色，导人谓此水源出硫穴下，是沸泉也。余以一指试之，犹甚热。扶杖蹑巉石渡，更进二三里，林木忽断，始见前山。又陟一小颠，觉履底渐热，视草色萎黄无生意，望前山半麓，白气缕缕，如山云乍吐，摇曳青嶂间，导人指曰：'是硫穴也'。风至，硫气甚恶。更进半里，草木不生，地热如炙，左右两山多巨石，为硫气所蚀，剥蚀如粉，白气五十余道，皆从地底腾激而出，沸珠喷溅，出地尺许。余揽衣即穴旁视之，闻怒雷震荡地底，而惊涛与沸鼎声闻之，地复岌岌欲动，令人心悸。盖周广百亩间，实一大沸镬，余身乃行镬盖上，所赖以不陷者，热气鼓之耳。在旁巨石间一穴独大，思巨石无陷理，乃即石上俯瞰之，空中毒焰扑人，目不能视，触脑欲裂，急退百步乃止。左旁一溪，声如倒峡，即沸泉所出源也。还就深林小憩，循旧路返，衣染硫气，累日不散，始悟之倒峡崩崖，轰耳不辍者，是硫穴中沸声也。"

郁永河描述的硫磺山，当时是一个放汽地面区，区内草木不生；周围为放热地面，区内草色枯黄。在放汽地面内，地热显示类型多种

多样，有喷气孔、硫质气孔、沸泉、沸喷泉、热水河等。区内的喷气孔多达50多个，喷高可达30~40厘米不等，喷气孔的温度按当地高程可达96℃以上，放汽地面土壤的温度也可达60℃~70℃。喷气孔中喷出的气体除大量水蒸气外，可能还有CO_2、SO_2、H_2S和微量的CO，所以在“磺山左右，毒气蒸郁，触者昏闷”。区内的岩石已强烈蚀变，变成白色的高岭石。硫质气孔附近有许多硫磺，它们的雛晶闪闪发光，以手撚之，晶体间摩擦发出飒飒之声。硫磺晶体与高岭石混合形成硫土。北投地区的热泉水为酸性硫酸盐—氯化物水，啖之具有酸咸苦辣之感，不堪下咽，具有强烈的腐蚀性。然而时过境迁，300多年来的硫磺山已是今非昔比，遥想当年那种“林木蓊翳”，“径茅高丈余，两手排之，侧体而入……，草下一径逶迤，仅容蛇伏，……五步之内，已各不相见”的自然景观已不复存在。但是，硫磺山还在采硫，当年的放汽地面是否尚存，只好待笔者有机会造访台湾之时方能知道。

三　水热爆炸

在一个沸泉区或高温热泉区，常可见到一些大小不等的圆形深坑。有的坑径不盈尺，有的坑大可达百余米，有的甚至可达数百米。有的坑已经积水成湖，有的坑裸露出新鲜的土层，从土层中有沸水飞溅。它们是火山口呢？还是天上飞来的陨石砸成的深坑呢？

记得在1975年7月，中国科学院青藏高原科学考察队在雅鲁藏布江南岸海拔4 700米的岗巴县科作进行考察时，发现了几处圆形的热水塘。塘口直径在1~5米不等，热水从塘底涌出，温度都在80℃以上。其中一处，坑口直径约2米，水色浑浊不堪，塘体略呈喇叭口状，四周堆着一圈松散的沙砾构成的碎石垣。当地的居民告知，这里的河滩原来有一个温泉，温度甚高。在1974年冬天，温泉突然发生了一次猛烈的爆炸。当时水汽泥沙和石块一齐飞出，喷高约10几米，好像炸药爆炸一样，持续时间长达4~5分钟。炸后半年之内，坑内猛烈涌水，高度达到半米。当时牧民用一根20米长的牦牛绳放入坑内，想探测坑的深度，没有碰到底。在科作之北40千米处的苦玛，沿着苦玛河边，

热水塘遍布，共有20余处。这些热水塘外形真像火山口，周围有垣（图7—4）。它不是岩浆喷出的堆积物，而是从塘中喷出的沙砾。据当地的牧民反映，每年那里都会发生4~5次爆炸，有时一年多达20次。



图7—4　西藏岗巴县苦玛水热爆炸区（章铭陶摄）

在沸泉区见到的这些爆炸坑，显然不是天外来客——陨石砸成的；也不是火山喷发的结果。它是地下水在过热和超压状态下，由于一些外来因素（如地震）激发引起的爆炸，是高温水热活动的产物，这种现象称为水热爆炸。

在西藏，沿着冈底斯山脉，水热爆炸区共11处，其中规模最大的是西藏阿里地区普兰县曲色涌巴（曾误称“曲普”）。普兰县的玛旁雍错，西藏人称为神湖。滚滚的扎藏布河从东南流进神湖。从神湖溯河而上，约6千米，在河的南岸就是曲色涌巴。当地海拔4 600多米，沸泉流涌，共有水热爆炸坑30多个，其规模大小不等。其中一个爆炸坑是在1975年11月12日爆炸的。当日的傍晚，一些牧民跟随牧群来到扎藏布河边，正准备在曲色涌巴对面的河滩上安顿下来，忽然听见从曲色涌巴方向传来震天的巨响，牛羊吓得四处逃散。只见那里烟雾一片，一股巨大的黑灰色烟柱冲天而起，一直上升到八九百米的高度，最后形成一团黑云飘走。爆炸抛出的石块直径可达30厘米，一直打到扎藏布河的北岸，爆炸时的情景就像电影中的原子弹爆炸一样。靠泉区西南端，可见到3个大的水热爆炸坑，呈北东向的直线排列，恰似一串葫芦。北部的两坑直径约为100米，互相套叠，喷出的碎屑物高达20米，其中一个坑已积水成湖，坑边沸泉呈鼓沸状，滔滔有声，跃起水面达尺许。想当年，这几个坑爆炸之时，出现怎样猛烈的景象，难以想象！（图7—5）

由曲色涌巴逆扎藏布河往东南约3千米，就是丹果其萨。在100米的河漫滩上，有一个哑铃状热水塘。其长39米，宽5~15米。它是



图 7—5　西藏普兰县曲色涌巴的水热爆炸区（章铭陶摄）

由 3 个水热爆炸穴组成，穴深 2 米左右，从坑底有深灰色的沸水（86℃）涌出，而且表现为无规律的阵发性。高潮时水柱从塘面腾起一米多高，但是过一夜之后，该泉又不再强烈地涌水了！可见，一个沸泉区的变化是多么大啊！

在皑皑白雪的念青唐古拉山下，蒸汽升腾的羊八井热水湖真像是草原上的一颗明珠。热水湖位于羊八井地热田的东北角，长轴近南北向，长约 110 米，短轴约长 80 米，其面积为 7 350 平方米。水面低于湖岸约 4 ~6 米，岸边为黄褐色泉胶砂岩，往下变为灰白色沙质黏土，湖为一个不规则的漏斗状，最大水深为 16.1 米，湖水自湖深处上涌。1975 年深的涌水口附近温度为 47.5℃，表部为 43.6℃左右，由于上、下水温不同而引起的密度差，使整个水体发生徐徐的湍动。这个热水湖很可能是很久以前一次水热爆炸形成的。自 1976 年热田正式开发以来，热水湖的温度已徐徐下降，特别是羊八井地热田两个 3 000 千瓦的机组正式运转以来，温度下降更快，在 1982 年降为 32℃，到 1984 年就已经降到只有 12℃了。

在羊八井地热田勘探过程中，有几个钻孔在钻井过程中和钻成之后都发生了水热爆炸，可以说是人工水热爆炸。1975 年 7 月 1 日开钻的羊 1 井，在钻进到 37.37 米时，钻入浅层热储层。当钻入到 38.89 米时，准备下井口管时，发生意外的井喷，不得不在 42.59 米处终孔。井喷所造成的大坑用 63 车石头填封，上用水泥弥合，并安置 108 毫米管

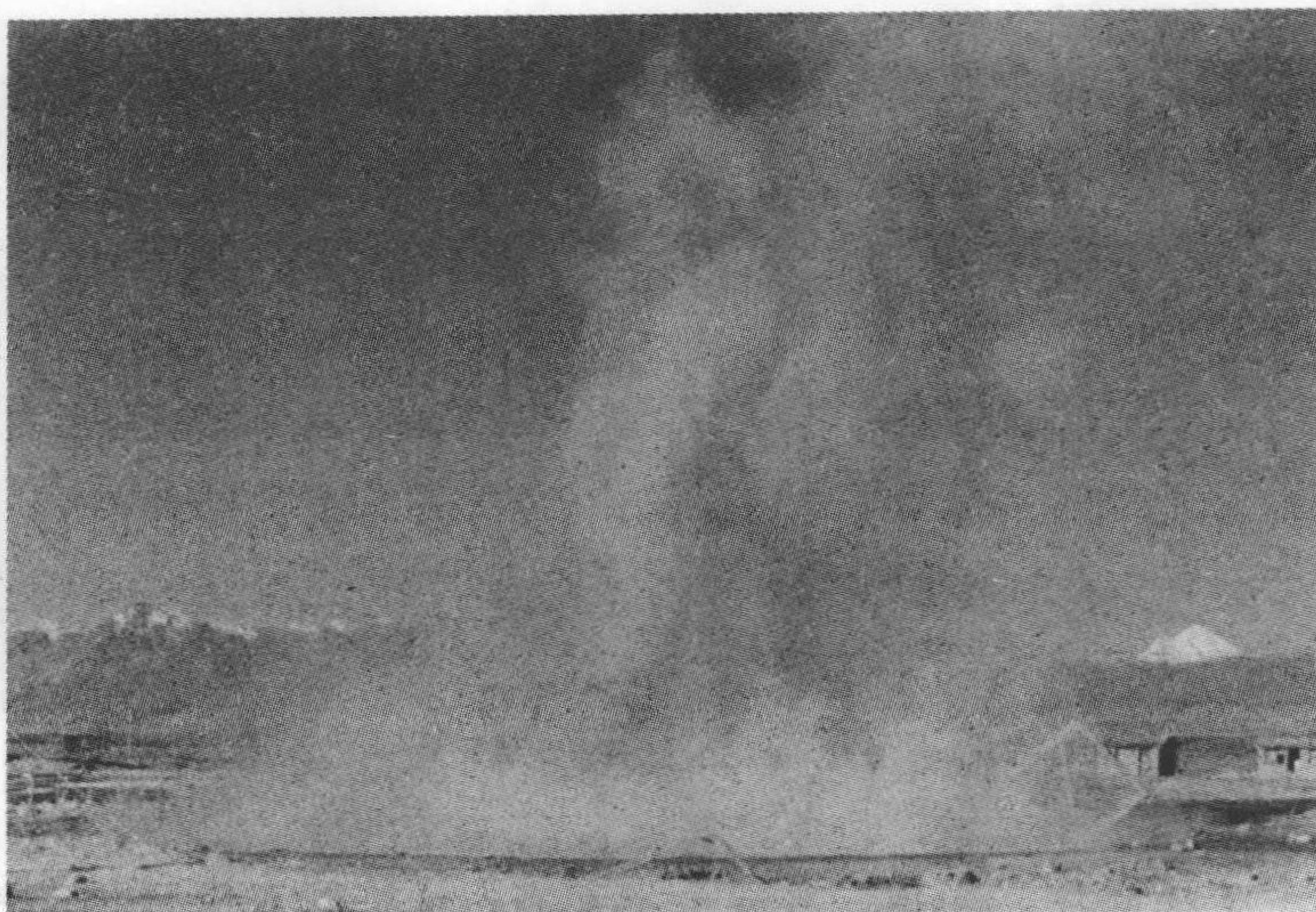


图 7—6 羊八井地热田 ZK322 孔发生水热爆炸的情况（汤松然摄）

子以供观测和放喷。1976 年 6 月，填方水泥面上已出现 150 多个汽眼、水眼，并在南侧出现一个很大的汽洞，从中喷涌灰白色汽水流，井口管也继续喷出水汽。1977 年 5 月，井口管停止排出汽水；10 月开始，南侧汽洞排出灰白色泥水，有时黏稠似浆。1977 年 12 月 4 日下午 2 时，突然一声巨响，一股又粗又浓的黑烟柱冲向天空，其高达 50 多米。直径 25 ~ 30 厘米的石块冲上天空，并散落在 50 米开外，而细粒泥砂的散落半径达 300 米。爆炸口直径东西向约 12 米，南北向约 10 米，爆炸坑的深度估计为 12 米。坑内热水冲击四壁，附近 50 米内一片乱石泥砂，井口管连同阀门、压力表等统统被冲断，向北倾倒，现场一片狼藉。图 7—6 是生产井 ZK322 孔怒喷的情况。该井于 1982 年 8 月 9 日和 10 日两次发生猛烈爆炸，当时汽水柱夹带碎石块抛到约 70 米的高度，井基形成直径 30 米、深约 10 米的大坑，炸后形成塘式间歇喷泉，每日喷发 1 ~ 2 次，喷射时水柱喷高约 20 米。

水热爆炸的现象不仅在西藏有，在滇西也有。前述的腾冲硫磺塘的大滚锅可能就是很早以前一次水热爆炸形成的。腾冲朗蒲热水塘也曾发生过水热爆炸。1974 年的时候，当地的一个沸泉塘位于泉华台地上，温度为 97℃。但是在 1980 年时，由于一次水热爆炸，使过去沸水

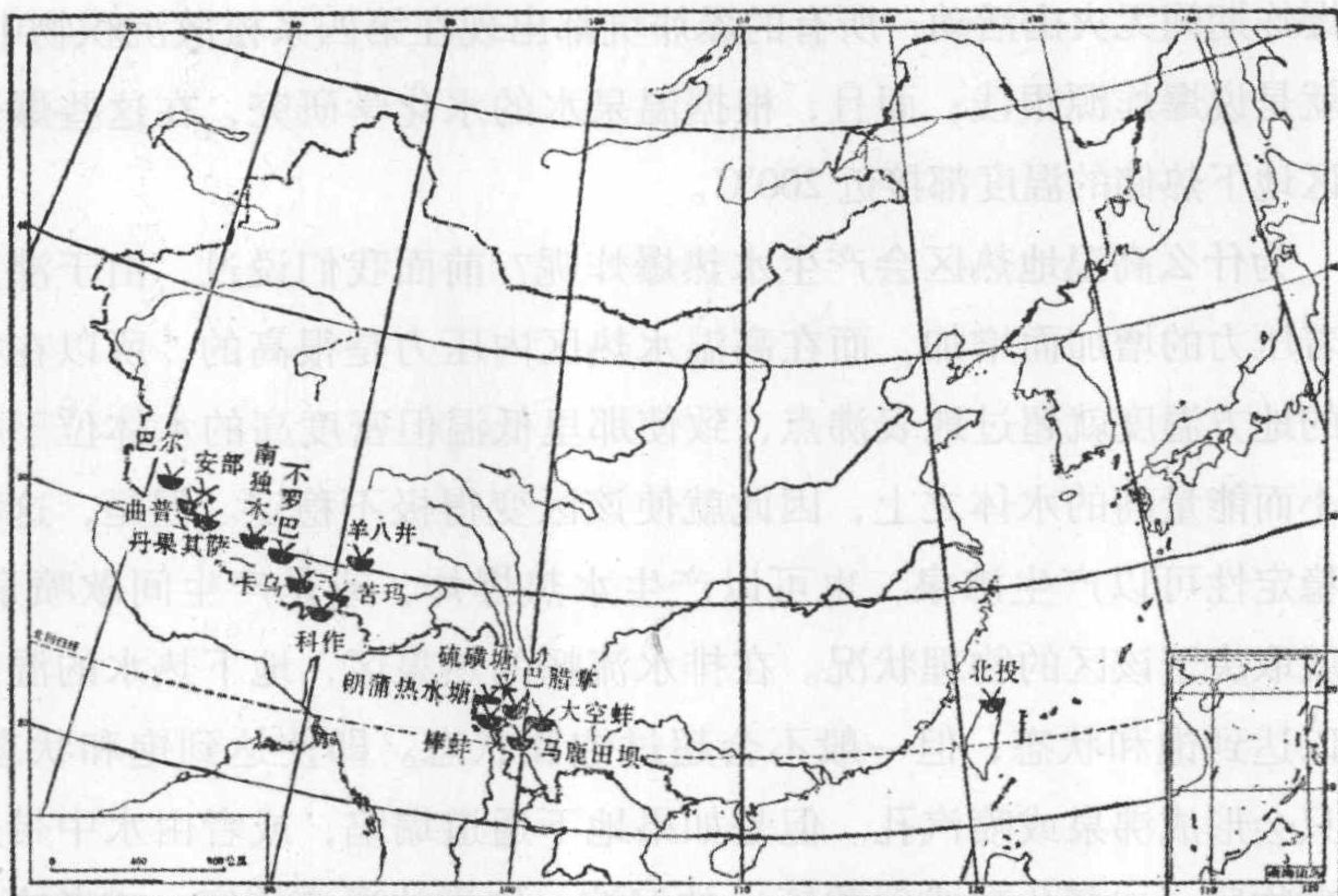


图 7—7　中国的水热爆炸区

翻腾的沸泉塘变成了温水塘，但是在泉华台地的下方形成了一个小水洞，沸水从洞中激喷出来。这种水热爆炸现象也发现于龙陵县的邦纳掌、云县的大控蚌、云县马鹿田坝和瑞丽的孔雀泉（图 7—7）。

水热爆炸不是中国独有的现象，在美国、日本、新西兰和意大利等国的高温沸泉区都有。美国的黄石公园地区就有十多个水热爆炸坑。美国加利福尼亚的大城湖，过去有一个不太显眼的热泉群，在 1951 年 3 月 1 日突然发生水热爆炸，犹似一座猛烈喷发的泥火山，喷出了 30 多万吨泥，接近 20 英亩的地方被强烈地破坏，形成了一个巨大的爆炸穴，细石块被抛掷到 4 英里以外，爆炸持续了好几天。随后，渐渐地减弱，水热活动中心由 1 个演变成 5 个。

水热爆炸与陨石碰撞无关，因为在爆炸坑中没有被震烈的锥面；也没有发现过高压矿物。水热爆炸也不是火山喷发，因为它没有岩浆的直接卷入，没有见到初生的火山喷发物。水热爆炸与火山喷发时的潜水水汽爆炸颇为相似，因为它们都是由于水迅速膨胀成蒸汽造成的。但潜水水汽爆炸是由岩浆和熔融的岩石注入到任何的地下水所引起的，它的喷出物没有水热蚀变现象，或者有时可伴随岩浆的喷出。我们所见到的水热爆炸区都出现在高温热泉区，它与现代地热活动关系密切；

在爆炸期间无火山活动；所有的爆炸坑都出现在第四系松散沉积物中，也就是说爆炸源很浅；而且，根据温泉水的水化学研究，在这些爆炸地区地下热储的温度都接近200℃。

为什么高温地热区会产生水热爆炸呢？前面我们说过，由于沸点随着压力的增加而增加，而在高温水热区内压力是很高的，所以在很浅的地方温度就超过地表沸点，致使那里低温但密度高的水体位于密度小而能量高的水体之上，因此就使该区变得极不稳定。但是，这种不稳定性可以产生沸泉，也可以产生水热爆炸，或是产生间歇喷泉，这就取决于该区的物理状况。在排水流畅的热泉区，地下热水的温度可以达到饱和状态，但一般不会超过饱和状态。即使达到饱和状态，也只会形成沸泉或喷汽孔。但是如果地下通道塌陷，或者由水中带来的矿物质（二氧化硅或碳酸钙）的沉淀，使排放通道堵塞；或者冷水的补给源减少；或是深部高温的热水的补给量加大，只要有其中一个因素都可促使储存于浅处的热水由饱和状态变成过热态，这种过热态的地下热水极不稳定，它总希望能放出能量回复到饱和状态，因此就膨胀变成蒸汽。当蒸汽的压力很大，并能超过上覆岩层的静压力时，就会将热水储层的顶盖掀掉，从而发生水热爆炸，并形成水热爆炸坑。

由于高温沸泉区是这样不稳定，在这些地区只要有任何压力下降，都可能触发水热爆炸。触发水热爆炸的因素可以是一些明显的外来事件（如地震）；也可以是一些现在还不清楚的且并不显眼的事情（如大气压力的下降，或补给系统的热量的轻微增减）等。云南龙陵县邦纳掌沸泉区所发生的三次水热爆炸，就可能是地震激发的。1976年5月29日龙陵发生了7.4级地震后，1976年7月21日在其北侧的清凉山区也发生了6.6级地震。震后数秒，邦纳掌沸泉区的河谷发出了闷雷般的爆炸声，一股高100多米的灰黑色浓烟直冲云天，峡谷顿时被炸出的汽水、泥砂所弥漫。紧接着又发生两次水热爆炸，但是爆炸强度一次比一次低。三次爆炸留下了三个坑，爆炸坑的大小约10平方米，彼此相距不超过30米。目前都已淤浅，深约30厘米，从坑底冒出的热水达90℃，水热爆炸坑沿北东—南西向排列，与区域构造断裂走向一致。显然，邦纳掌的水热爆炸是由清凉山的地震激发的。

四　间歇喷泉

自然界中最壮观而美丽的景象莫过于高温间歇喷泉。在一些高高的白色的硅华台地上，有着一个个圆圆的不深的洞口，有些洞口无声无息；有些洞口，充满热水，它们在水盆中轻轻地湍动，发出微微的声音。过了若干时辰，一股水柱突然从洞中慢慢地升起，并一点点地加高，片刻后，只见一股强大的沸水和蒸汽柱凌空而起，哗哗有声，直冲霄汉，最高的喷至100余米。持续一段时间后，水柱又慢慢回落，噪声变小，最后慢慢回复到原来的沉寂状态。一直间隔到相当时辰，才又重新发作。这种由热水和蒸汽柱以一定的时间间隔，向高空反复排放的热泉叫做间歇喷泉。

我国的间歇喷泉出现于青藏高原，以西藏居多，共有三个大的间歇泉区，即昂仁县打加（以前的报告称搭各加）、谢通门县的查布和那曲县谷露。还有一个小的间歇泉出现在藏南措美县的古堆。在青藏高原的东部，四川省巴塘县的茶洛间歇泉，也是一个规模较大的间歇泉。在云南龙陵县邦纳掌，也有一个由地震激发的小间歇泉。此外，在西藏羊八井，由于钻井活动出现了4个人工激发的间歇井（图7—8）。

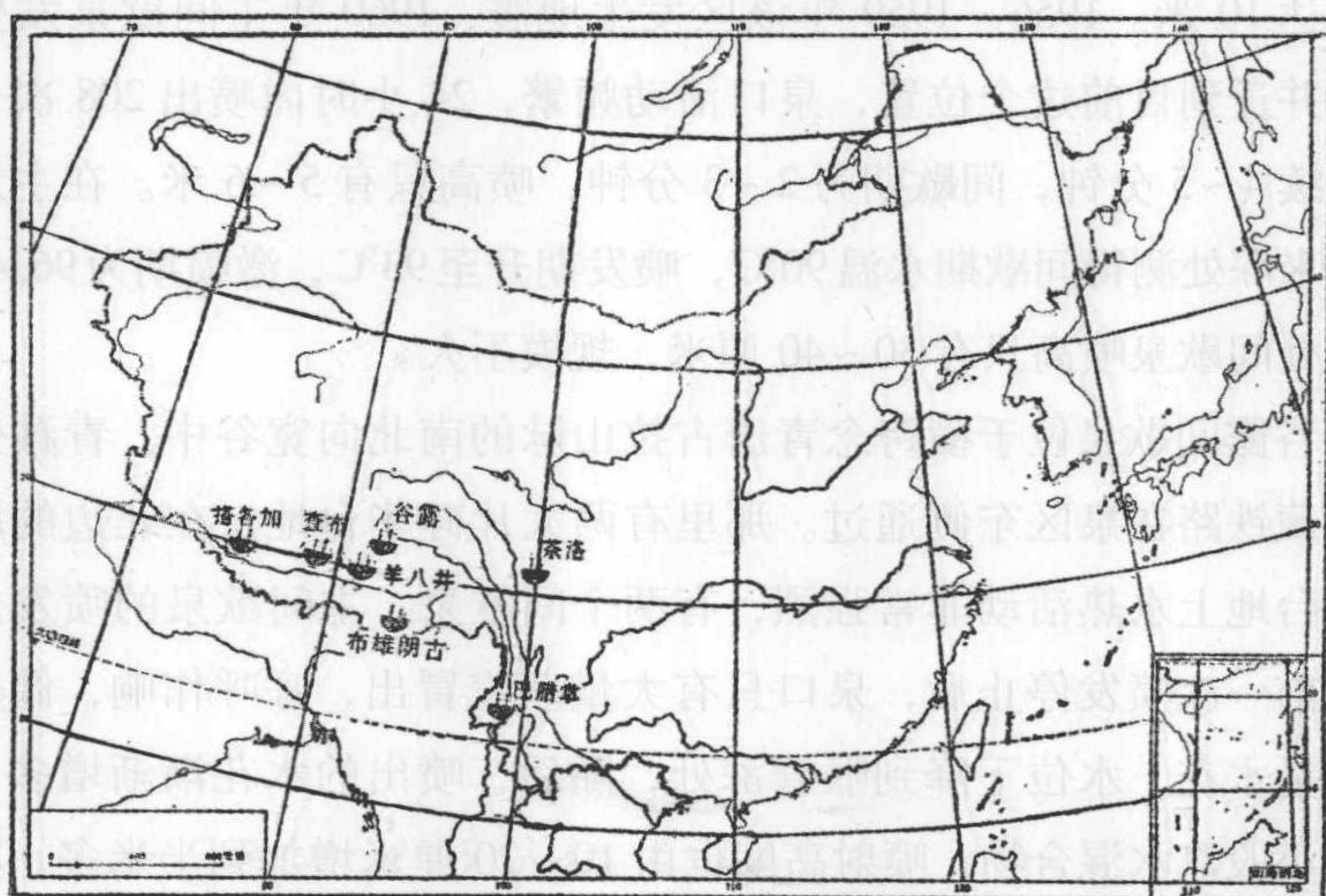


图7—8　中国的间歇喷泉

打加间歇喷泉位于冈底斯山脉的南麓多雄臧布河河源，该处为一沿近南北向的张性断裂形成的宽谷，海拔5 000米。泉区有众多的沸泉和热水塘，它们分布于一个拔河15~20米的平整的硅华台地之上，其中有4处间歇泉。主间歇泉的喷发极不规则，每一次的喷发也是复合型的，始喷时，泉口连同附近的热水塘水位慢慢上升，直到溢出泉口，这时称溢流阶段。随后是起喷，溢水流冲出泉口，由低渐高，然后回落，几经反复才猛烈上升，达最大高度，成为喷势最猛烈的激喷阶段。最后是汽水柱历经波浪式的回落阶段，直至汽水柱最后缩回泉口。激喷时，吼声如雷，冲出泉口的汽水柱迅速扩容，直径达2米，喷高约30米，景象十分壮观。另一处间歇泉位于河岸的泉华壁上，喷发有规律，间歇期达一天半，喷出的汽水柱由近及远，由缓到急，以45°角喷向河床，射程达20米，枯水期可达对岸，犹似横跨激流的银桥，每次激喷25分钟后渐渐减弱。第三个位于一个高一米的泉华锥之上，间歇期为5~6小时。此外，还有一处间歇泉，规模很小，喷发很不规律，喷高只有1米。

查布间歇喷泉位于冈底斯山脉的另一条南北向山谷中，海拔4 800米。泉区的沸泉和热泉共有200多处，其中间歇泉两处。1952年中国科学院西藏科学工作队曾到过泉区，观察到间歇泉每日活动4次，喷高可达10米。1956~1959年该区发生地震，1960年主间歇泉发生迁移，并迁到目前这个位置，泉口活动频繁，24小时内喷出208次，每次持续4~5分钟，间歇期为2~3分钟，喷高只有5~6米。在主泉口内3米深处测得间歇期水温90℃，喷发期升至93℃，激喷期为96.4℃。另一处间歇泉喷高只有30~40厘米，规模不大。

谷露间歇泉位于横跨念青唐古拉山脉的南北向宽谷中。青藏公路和青藏铁路在泉区东侧通过。那里有两大片硅华台地，在北边的那个硅华台地上水热活动非常强烈，有两个间歇泉。主间歇泉的喷发规律是：前一次喷发停止后，泉口只有大量蒸汽冒出，呼呼作响，偶尔溅出少量水花，水位下降到喉管深处，随后，喷出的水花渐渐增多，并变成小股汽水混合物，喷射高度也由10~20厘米增加到半米多，频率也相应增加，由一分钟几次增加到80次，同时水位慢慢高升，最后充

满泉坑；一旦沸水溢出泉坑，汽水柱陡然跃起，很少超过一人高，1～2分钟后即达激喷阶段，汽水柱喷高达5米，最高可达7米，平均每天喷发16次，每次持续约48分钟，间歇期约44分钟。在喷发过程中水温也有明显变化，在间歇期为84.3℃，低于当地高程的沸点；起喷时增温至86℃，激喷时可达88.1℃，激喷后很快降到86.2℃，然后再下落到84.3℃。另一个间歇泉距主泉口3米，略呈间歇现象，喷发规律与主泉口相同，但起喷要比主泉口早10分钟，停喷早20分钟，喷高不足2米。

茶洛间歇泉是我国另一个比较大的间歇喷泉，位于四川省甘孜藏族自治州的巴塘县，在一个长1 000米、宽200米的狭长河谷中，海拔3 600米。泉区地热显示强烈，有喷汽孔、沸泉和热泉，其中有4个间歇喷泉。喷出热水的温度约88.5℃。各个泉的排放量都不大。4个间歇泉中有1个位于硅华台地之上，另外3个从洪积扇中喷出。它们的喷发都比较复杂。其中1个间歇泉在一天内大喷发8次，中等规模的喷发达190次，小规模喷发2 000次。每一次大喷发喷高为2～4.5米，持续15～20分钟，中等规模的喷发喷高达40厘米，小喷发喷高仅有20厘米。

滇西龙陵县邦纳掌有一个由地震激发而成的间歇泉，它出现在硅华台地之上。1976年5月29日龙陵地震之前没有此泉。此泉喷高1米，每次喷发30秒，间歇期1分钟。

西藏山南地区措美县古堆地热区地热显示强烈。在布雄朗古显示区也有一个小规模的间歇泉。喷高不足半米。

间歇泉不是中国特有的地热显示。据目前所知，在北美西部、智利、日本、俄罗斯勘察加、印度尼西亚、新西兰、冰岛和亚速尔群岛都有间歇泉活动。1848年首先对冰岛的大间歇泉作了研究工作。美国西部的黄石公园是世界上最大的间歇泉区，那里的间歇泉有200多处，其中，最著名的是“老实泉”，它每隔35～90分钟喷1次，喷高可达90米，每次激喷持续2～5分钟。目前世界上许多间歇泉区都开辟为国家公园，以招徕游客。

世界上所有的间歇泉没有一个是具有相同的喷发模式的，它们都

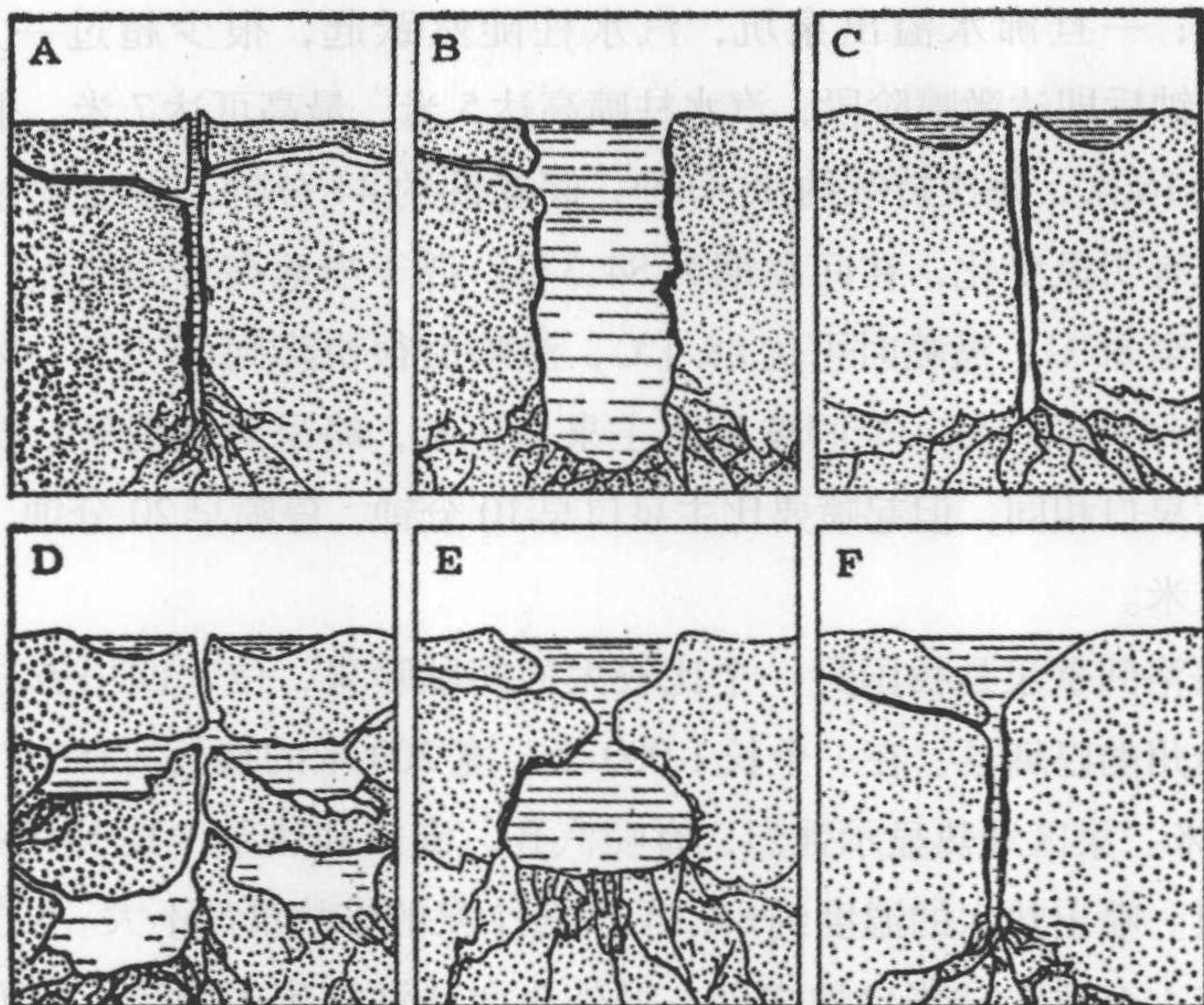
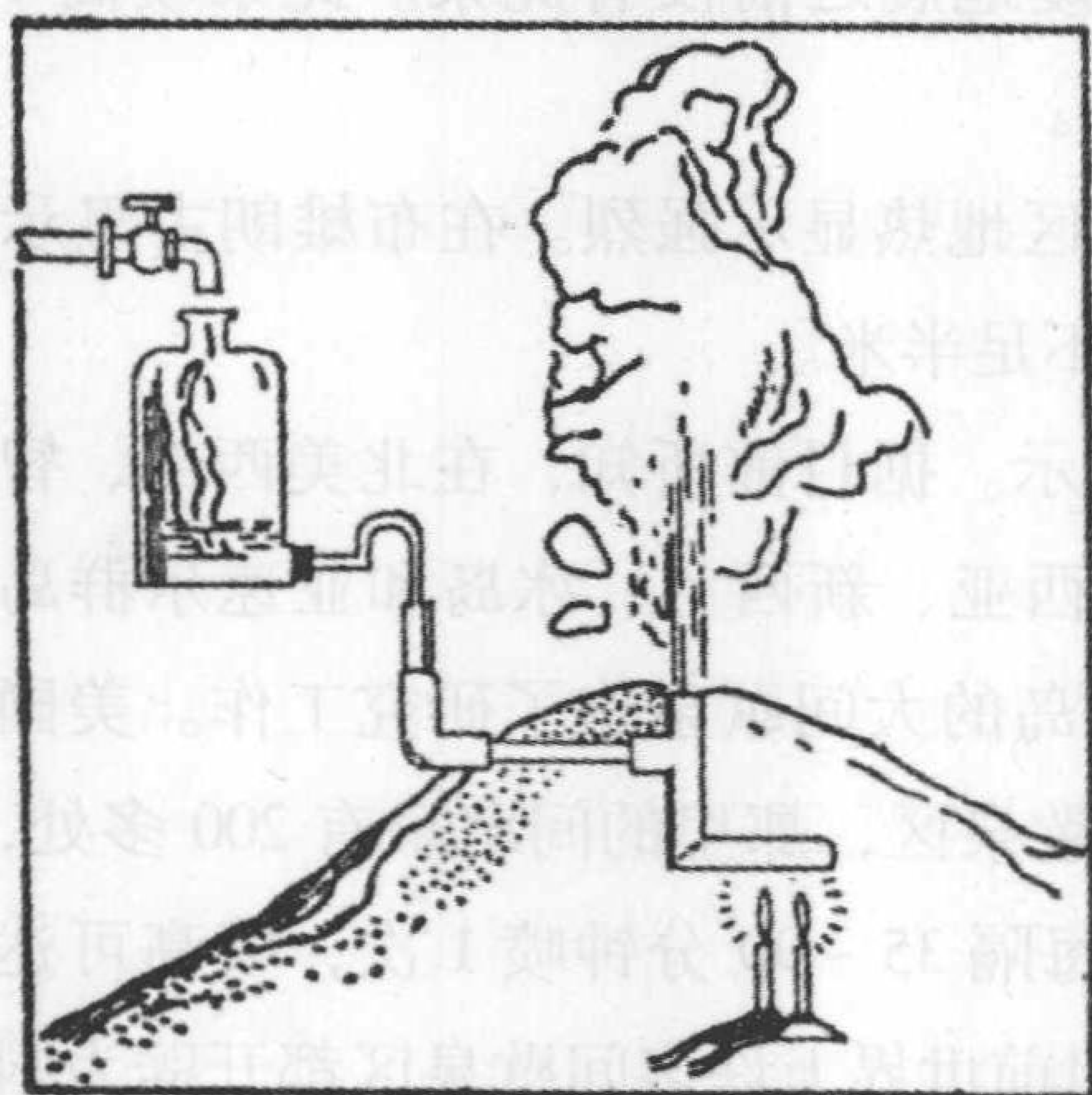


图 7—9 间歇泉水室 6 种成因类型的剖面图（据 J. S. Rinehart，1974）

有各自的特点，这是由于地下构造千差万别所决定的（图 7—9）。但是不管哪一种间歇泉，它都是由下列 4 个要素构成的：喷射喉管、水室、给水系统和热源。对于间歇泉水室的状况人们并不十分了解，因为人们的眼睛穿不到地下。它可能是一个紧凑的、密闭良好的洞穴，或者是一系列相互流通的洞穴系统。而给水系统则十分复杂，有人猜测，其中一些是比较浅的，能供给水室大量的水。一些非常深，能供给少量非常热的热水，它们很可能是由地下深处的热源加热的。1902 年曼比给间歇泉设计了一个间歇泉模型（图 7—10）。在水室中的水由于局部受热，热含量会明显上升，由于水的温度增加，比重就下降，压力增加


图 7—10 曼比设计的模拟间歇泉（1902）

喷口直径 6 毫米，喷发间歇期为 10 分钟

时，沸点上升，当热水汽化成汽时，体积增加1 500倍。在水室内较重的和较冷的水压在较轻的和较热的水上，从而使水室变得极不稳定。当继续加热，汽化猛烈膨胀时，就会将水冲出水室。水激喷停止后，水室又注入冷水，又暂时变得稳定。然后，由于加热，又开始变得不稳定，从而开始了另一个旋回。自然界的间歇喷泉很可能就是这样形成的。

五　泉华花拾

泉华是温泉带到地面的沉积物。它美丽多姿，是大自然生命的凝结，犹如一幅优美的风情画，使人勾起奇妙的神思。

当你奔向西藏阿里地区的门士热泉，一座白色的“城堡”就展现在眼前。“城”中“炊烟”缭绕，碧澄清丽的象泉河水，像一条玉带似的从南面绕过这座“城堡”，异样的“白城”绿水，构成一派别致的景象。走近这座小小的“城堡”时，发现它并无城门，拾级而上，约高5~6米，到达顶上，这才发现它是一座“实心城”，面积约0.1平方千米。城中没有居民，而是两个热泉，沸汤滚滚，蒸汽升腾。在坑中放下温度计，那滚滚的沸水，却只有71℃。啊！原来促使热水翻花，只不过是地下深处的水含有大量CO_2气体。它一旦抵达地表，压力降低，也就得到解放，向空中逃之夭夭了。更令人惊奇的是，在泉坑之中，随着水花的翻滚，可见到一粒粒的豆粒，其大小不一，大的如豌豆，小的似鱼子。如果用小刀切开，可以看到同心的壳层，其层次分明，核心部分则是砂粒。原来，泉水从泉口流出时，常常带来地下的砂粒。随着泉水的湍动和翻滚，而水中的CO_2随着压力下降逸逃之后，再加上阿里气候特别干燥，很容易使泉坑中的溶液含有过量的$CaCO_3$，从而使溶液中碳酸钙达到过饱和状态。在这种特定的条件下，每个翻滚的砂粒，其各个面都能和过饱和的碳酸钙溶液均匀接触，形成了层次分明的同心层外壳。如果再走下“城堡”，仔细观察“城墙”的结构，它层层叠垒，韵律分明，各层之间见到针状文石垂直层面排列。原来“城墙”是由厚层碳酸钙组成的钙华台地。它们在象泉河的

河漫滩上，年复一年的增长起来。因为这里地形坦荡，有利于碳酸钙的沉淀，而且环境长期稳定，不知经过多少岁月才达到现在这样高。即使涛涛的象泉河水，也没有把它们冲跑，也许是这些碳酸钙沉淀得比较快，而且易干涸，变干的钙华可能相当坚硬，即使在那洪峰来临，汹涌的象泉河流过它时，只是激起更高的浪花。

“城堡”的北侧是一个断层崖，它的上面披盖着泉华，形成泉华陡壁。用地质锤敲打，其岩质异常坚硬，纹丝不动。经仔细观察，它的结构与泉华台地很不一样，是由二氧化硅组成的硅华。它们可能是热泉活动的早期，沿断裂沉淀的硅华。沿着断崖，逆河而上，约数10米，见一阶地，拔河约20米，有路可攀，拾级而上，到达阶地面上。一片泉华锥林展现眼前，它们彼此孤立，好像少林寺的塔林，每个高2～3米，底径1～2米，锥体已无泉水出露，但在顶部留有一碗口大的干涸泉口。有些锥体已经破坏，露出断面，内部成层明显，顺锥体倾斜，它们也是由碳酸钙沉淀而成的。更有趣的是，藏族人民把这些泉华锥当作转经塔，每个锥基都围堆着刻着藏文“阿吗呢塔嘛呢”的石块，意即“南无阿弥陀佛”。站在泉华锥林之中，抬头向上看，山顶皆白，非同一般，它并非高山白雪，而是高岭石化的结果，在山岭顶上，屹立着一些小小的泉华柱（图7—11）。可惜坡壁陡峻，力不从心，难以攀爬。这些泉华柱和泉华锥的形成说明那里热水的压头甚高，矿化

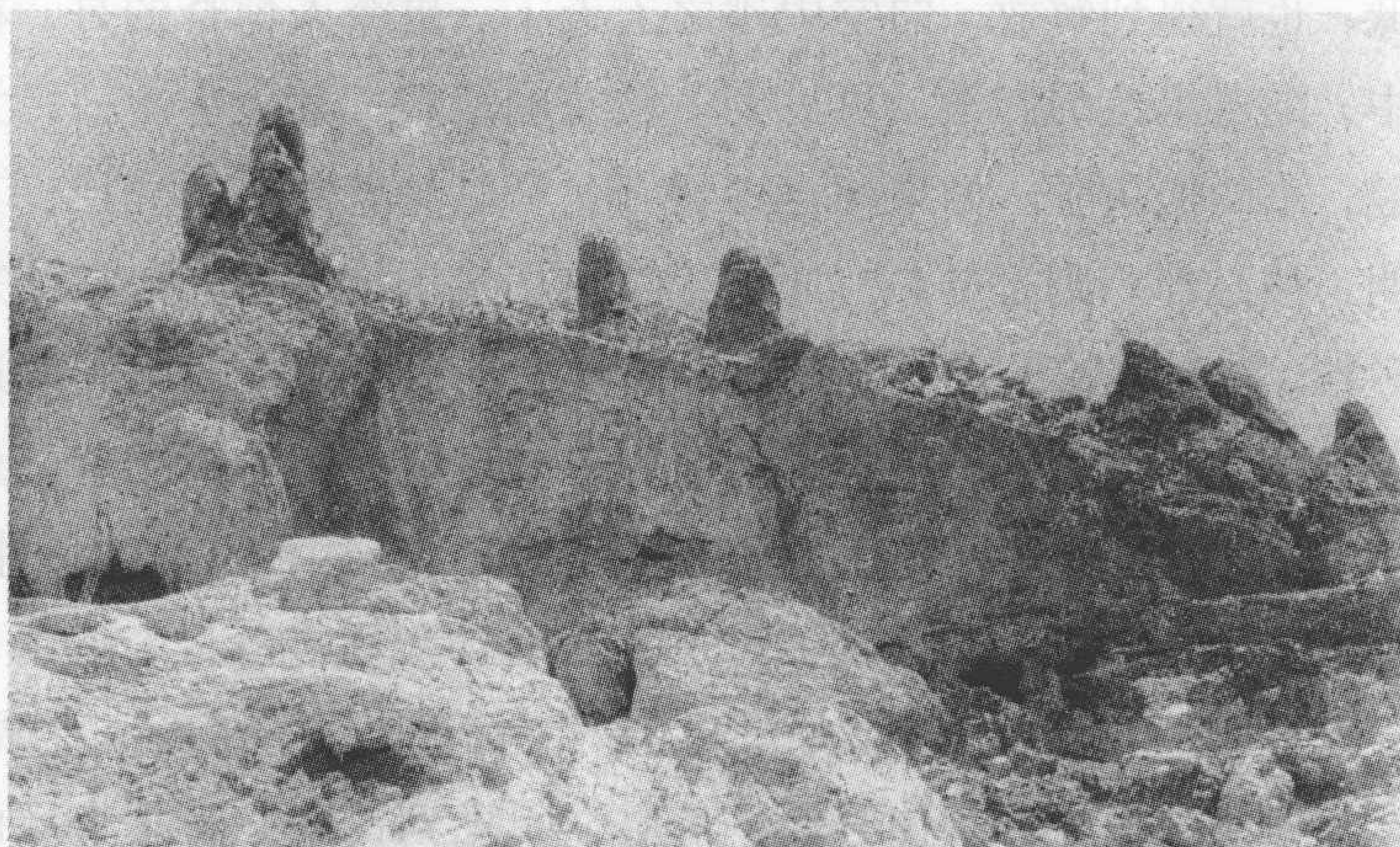
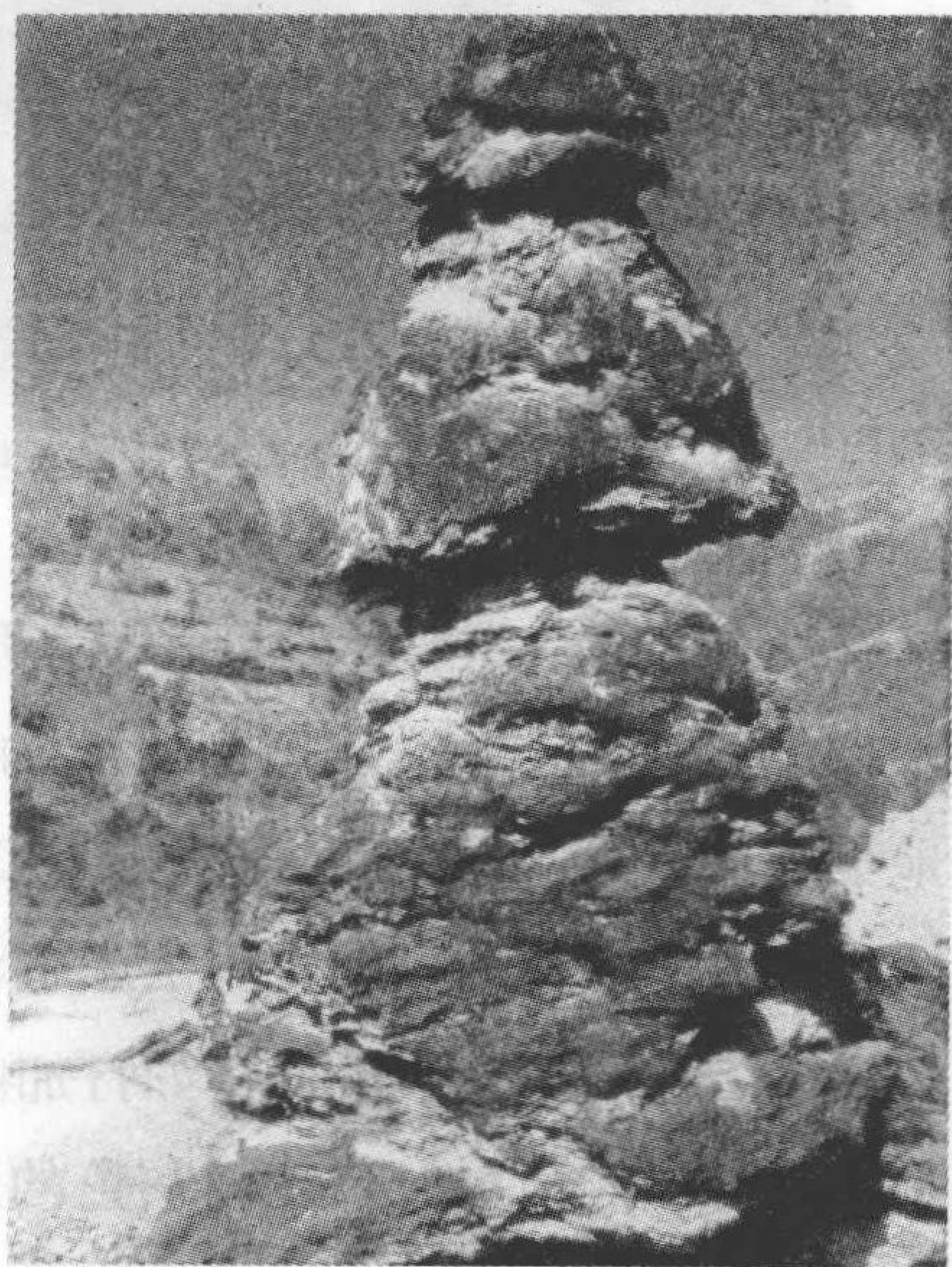


图7—11　门士热泉区山顶的泉华柱

度高，气候干燥，气压又低，蒸发极快，从而致使泉华体迅速上涨。如果涌水量稍大就形成泉华锥，当涌水量较小时就形成细长的泉华柱。

门士之行对认识各种各样的泉华很有裨益，令人大开眼界。其实，在西藏考察的354个水热区中，有泉华发育的泉区为数不少。其中出现钙华的达140处，其中有13处只见钙华，不见泉水，是已经死亡的温泉。另外出现大规模硅华的水热区有15处，如谷露、打加、古堆、羊八井、查布、色米等。在滇西和川西，只有少量地区出现硅华，如热海热田的硫磺塘，龙陵县的邦纳掌。大部分地区都是钙华。


图7—12　云南昌宁县鸡飞澡塘的泉华锥

钙华的形态多姿多彩，所见到的钙华体有泉华柱、泉华锥、泉华冢、泉华丘、泉华扇、泉华台地、泉华陡壁、泉华脊、泉华墙和泉华洞穴等。有的只出现泉华台地，有的只见泉华锥笔立，有的则以泉华石林而著称。如藏北高原腹心的龙马尔热泉，泉华石林密茂。柱体一般高2～3米，最高可达7米，直径为0.5～1米。柱顶有的呈尖锥状，有的呈馒头状。有的柱顶泉水漫流；有的则高过它的静水压头，而停止涌水。云南昌宁县鸡飞澡塘，自古以来就以众多美丽的泉华锥而驰名。邻近山边为一泉华丘，可能年代久远，钙华酷似灰岩，泉华丘上有一澡池。泉华丘内颇多岩洞，洞中修池，沐浴时别有风味。泉华丘前有一小溪，溪边是一排泉华锥，其中以雌、雄二锥最著名（图7—12)。川西康定县的榆林宫地热田灌顶显示区的泉华锥别具风味，当地称它为灌顶突泉、火龙石、药水石室。川西道孚县的霍格微温泉，其温度虽仅20℃，但钙华的形状最为特殊，酷似豹头，高数十米。泉在山坡上，泉华由山坡侧向长出，愈伸愈远，潺潺流泉从豹头下泻，真是“飞流直下三千尺”，蔚为奇观（图7—13)。但是，不管哪种形状的钙



图 7—13　四川道孚县霍格微温泉的钙华体（张知非摄）

华，都是富含重碳酸钙的泉水，上升到地表以后，二氧化碳大量溢出，水分蒸发，沉淀出碳酸钙而形成的。一般认为，有钙华出现的温泉，地下热水储的温度都不会超过 150℃。

硅华出现在沸泉区或温度接近沸点的热泉区，其形态要比钙华简单得多。有的为泉华台地，如打加间歇泉和谷露间歇泉均位于硅华台地之上，它们为灰白色至青灰色的蛋白石硅华，成层明显。有时硅华形成泉华丘，如西藏古堆沸泉区的泉华丘，高出雄曲河四五百米，主体为灰白色蛋白石硅华，但在东北部有一片肉红色玉髓组成的山头，好像一座玛瑙山。还有一些硅华呈岩脉状，充填于岩石裂隙之中，宽 10 厘米到 1 米。如西藏阿里地区朗久的硅华脉就充填于新生界火山岩的裂隙之中。在国外，也有一些硅华形成硅华锥。如美国黄石公园猛犸象盆地硅华台地之麓的硅华锥。与钙华相比，硅华形成的原因多少有些不同。二氧化硅在热水中的溶解量和温度关系密切，泉水温度愈高，溶解愈多，当热水冷却，二氧化硅就会发生沉淀。但沉淀是个非常缓慢的过程，当热水中所含二氧化硅被泉水流带到地表，由于温度降低和静水压力的减小，使热水发生蒸发沸腾，从而使二氧化硅的过

饱和程度增加，热水溶液变成胶体溶液，进一步变干成为凝胶状氧化硅或蛋白石。随着时间的推移，这些非晶质的二氧化硅脱水，变成玉髓或石英。硅华出现的地区，其热储温度肯定会超过 150℃。

门士热泉区以钙华为主，有少量硅华。从门士温泉泉华的分布和变迁可以看出，门士热泉地热活动的历史。在门士地热活动的早期，地下温度可能较高，因此沿断裂有硅华出露，并使小山上的沉积物蚀变形成高岭石化。在小山山顶则出现一些小泉华柱。后来小山抬升，沿着河床堆积了钙华锥林。然后，这里的地壳又进一步抬升，泉华锥林形成阶地，热泉水位则下降。目前正在活动的泉已出现在河漫滩上，并在河漫滩上逐渐形成一个大型泉华台地。

第八章

温泉探秘

一　酸甜苦辣，无所不有

如果能到温泉区旅游，那一泓热水，有的灰黑，有的清澈透明；有的臭不可闻，触者昏闷；有的毫无异味，令人心旷神怡；有的滑腻异常，有的洁如河水；有的能祛风强胃，有的能利尿明目。不同的温泉水质异样。即使在一个泉区，不同的泉眼，其水质也可能迥异。我们的祖先早就注意到了温泉水质的差别，并且在几百年前就将温泉分门别类，宋朝胡仔的《苕溪渔隐丛话》就把温泉分为下列几类：

（1）硫磺泉，汤泉多作硫磺气，浴之则袭人肌肤；

（2）朱砂泉，唯新安黄山是朱砂泉，春时水即微红色；

（3）矾石泉，长安骊山是矾石泉，不甚作气也；

（4）雄黄泉，朱砂泉虽红而不热，当是雄黄耳；

（5）砒石泉，有砒石处，亦有汤泉，浴之有毒。

这种分类虽然与现代热泉的化学分类有很大差别，但是从当时的生产和科学水平来看，也应当是相当科学的，因为它是以物质作基础，不是随随便便乱分的。

温泉水的色、香、味的差别，是由于水中所含离子不一样。热水中的阳离子主要为 Na、K、Ca、Mg。一般高温热水中 Na、K 离子居多；低温热水以 Ca、Mg 居多；热水中的阴离子主要为 HCO_3、CO_3、Cl、SO_4。热水中的其他离子有 F、Br、I 等卤族元素，还有 Li、Rb、Cs 等稀碱金属。热水温度高，F 的含量也高；Li 的含量在热水中远高于普通地下水，常常用它来作为寻找地下热水的上升通道。热水中还含有 B、As、NH_4、H_2S、SiO_2。此外，还常常含有一些微量元素，如 Mn、Fe、Ni、Cu、Pb、Zn、Ag 和 Au 等。热水的酸碱度则是由热水中所含氢离子浓度来决定。上述元素按不同比例进行组合就形成不同类型的热水，也就带来不同的色、香、味。此外，热水中常常含有许多气体，其中除了大量水蒸气外，还有许多不凝气体，如 CO_2、SO_2、H_2S、HCl、HF、H_2、CH_4、N_2、NH_3 等，西藏的热水中还含有许多 B。H_2S 气体的气味是十分难闻的，CO_2 则会令人窒息。

目前对热水进行化学分类，主要是根据阳离子与阴离子所占的比率。大体上可以分为以下几类：

（1）氯化钠（Cl-Na）型水，氯化钠就是我们人类生活中不可或缺的食盐，所以可以把它们叫做盐水。水中的阳离子主要是 Na，阴离子主要是 Cl。这种水尝起来一定是咸味的。它们常常是中性的或弱碱性的。水中一般富含 HBO_2、F、As、LI、Cs 和 SiO_2。许多高温热泉常常排放这种类型的水。当有冷水掺和时，就变成 Cl. HCO_3—Na 型水，当冷水掺和很多时，就可变成 HCO_3. Cl-Na 水。如果这种类型的水含 As 很高，就形成砒石泉，饮之有毒。

（2）硫酸型水，这种水阴离子主要是硫酸根。再根据阳离子的差别，可以分为硫酸钠亚型或硫酸钙亚型。硫酸钠亚型水的温度一般比较高，它们常常存在于高温地热区的水流不畅的小水塘之中。它是由于地下热水中的硫化氢在地表的氧化而形成；或是地热蒸汽在接近地表时加热地表冷水而形成，这种水是酸性的，像硫酸一样有着强烈的腐蚀性。硫酸钙亚型的水温度比较低，它们化合成石膏。因此，这种类型的水尝起来一定是苦的。

（3）重碳酸水，阴离子中重碳酸根占绝对优势，它们常常是中性的或微酸性的。水中的氯离子含量很少，与氯离子有关的那些元素如 F、Li、Rb、Cs、As 和 HBO_2 等的含量都很少。阳离子主要是 Na 或 Ca，有时 Mg 的含量也很高。在重碳酸型水中，如果 Na 含量较高，水温也通常比较高；如果 Ca 或 Mg 的含量比较高，水温就比较低。如果碳酸水出现在现代火山区，它们常常是火山活动晚期的典型产物，也是一种珍贵的含气体的矿泉水。矿化度低的、含铁的重碳酸钙水为最珍贵的冷矿泉水。如俄罗斯基斯洛沃德斯克的钠尔赞泉和布里亚特蒙古的阿尔善泉、赤塔州的达拉松泉，我国辽宁皮口矿泉都是属于这种类型，它们常常是优良的可供饮用的矿泉水。

上面三大类型水之间还可以出现许多混合类型的水。如台湾北投的酸性硫酸盐氯化物水，是由于被冷的地下水稀释深部酸性氯化物水而形成的。

现将一些典型地区热泉水的化学组分表列于表 8—1 中。

表 8—1 典型地热区热泉水的化学组分

	西藏萨迦卡乌	云南腾冲朗蒲热水塘	台湾台北马槽205孔	云南云县大控蚌	西藏类乌齐卡隆	云南凤庆白河边
温度℃	82	97.2		96	33	36
pH	8.55	8.48	2.4	8.00	5.5	7.5
Na	560	725	5490	120	31.0	8.75
K	78	68.1	900	20.7	3.75	1.20
Ca	5.15	1.43	1470	2.21	128	53.1
Mg	2.08	0.42	131	0.92	95.8	3.21
Li	19.8	3.03	26	0.94	0.06	---
Rb	1.70	0.97	12	0.18	0.05	---
Cs	0.55	0.26	9.6	0.81	---	---
NH_4	7.24	0.32	38	2.18	---	---
Fe	0.30	---	220		---	---
Mn	---	---	42		---	---
Al	0	---	?		---	---
CO_3	103	21.9	0	0	0	0
HCO_3	505	127.5	0	374	867	222
SO_4	32.1	36.0	350	50.6	54.2	6.03
Cl	602	315	13400	6.99	14.5	3.49
F	7.9	12.1	7.0	13.2	0.48	0.101
Br	---	---	---	---	---	---
I	---	---	---	---	---	---
SiO_2	152	151	639	187	32.7	20.0
H_3PO_4	---	---	---	---	---	---
HBO_2	500	18.1	（B） 106	12.7	3.5	0.121
As	0.072	0.16	?	0.04	0	0.01
H_2S	---	---	?	---	---	---
TDS	2.32	1.98	22.84	0.66	0.798	0.21
水化学类型	Cl. HCO_3. CO_3-Na	HCO_3. Cl-Na	Cl. SO_4-Na	HCO_3-Na	HCO_3-MgCa	HCO_3-Ca

分析上表所列举的 6 个温泉的水化学资料可以说明它们形成环境的不同。卡乌温泉位于西藏南部萨迦县，是一个水热爆炸区，排放的是高硼的氯化钠型水，西藏南部地壳内部可能存在熔融的岩浆囊，成为地热活动的热源。朗蒲热水塘为云南腾冲县的一个水热爆炸区，在腾冲热海热田的西南角，排放低硼的重碳酸氯化钠型水，即受大量冷

水掺合的氯化钠型水。腾冲县在新近纪有过强烈的火山活动，热海热田7千米深处就有一个正在冷凝的岩浆囊。台湾的马槽位于大屯火山区，排放氯硫酸盐型水，强酸性，矿化度极高。云南云县的大控蚌为一湿喷汽孔区，恰位于南定河断裂上，围岩为澜沧群变质岩，排放低矿化度的重碳酸钠型水，可能是水沿着大断裂深循环的大气水。卡萨位于西藏昌都地区，排放重碳酸镁钙型水。云南西部凤庆县的白河边，出露于石灰岩地区，排放重碳酸钙水，是典型的岩溶水。

从温泉浴疗的角度来看，上述分类当然满足不了人们的要求。1964年在北京小汤山召开的理疗疗养专业会，根据水的理化性质，制订了医疗矿泉分类方案，见表8—2。

表8—2

名称	矿化度（g/L）	主要阴离子	主要阳离子	特殊性质
氡泉				>20 埃曼
碳酸泉				CO_2 >500mg/L
硫化氢泉				H_2S >2mg/L
碳酸氢钠泉	>1	HCO_3	Na	
碳酸氢钙泉	>1	HCO_3	Ca	
硫酸钠泉	>1	SO_4	Na	
硫酸钙泉	>1	SO_4	Ca	
硫酸镁泉	>1	SO_4	Mg	
氯化钠泉	>1	Cl	Na	
铁泉				全 Fe >10mg/L
碘泉				I >10mg/L
溴泉				Br >5mg/L
硅酸泉				H_2SiO_3 >50mg/L
淡温泉	<1			34℃以上

不同性质的矿泉其作用也不相同。如碳酸泉能产生游离碳酸，可促进胃肠黏膜的血液循环，不仅促进消化道水分的吸收；另一方面使胃肠分泌旺盛，增加胃酸；另外它还是良好的消暑饮料。重碳酸钠泉饮后能中和胃酸，能治疗慢性卡它性胃炎，还可促进胰腺分泌，帮助淀粉脂肪类消化。硫酸盐泉含有不易吸收的硫酸镁或硫酸钠，饭后有下泻作用；还能松弛胆管括约肌，促进胆汁排泄。氡泉能促进机体新陈代谢，兴奋造血器官，调整心血管功能，刺激内分泌腺，并对神经系统有镇静止痛

作用。砷泉则对皮肤狼疮、疥疮和皮肤霉菌病有很好疗效。在此就不一一列举。当然，上述的分类也是不完善的，如没有明矾泉、硫磺泉、硼酸泉等。如西藏许多温泉含偏硼酸特别多，如阿里地区噶尔县的索多沸泉偏硼酸含量达到1 900mg/L，超过泉水中主要阳离子和阴离子的总和，藏族人民常常利用它们来治疗眼疾，其疗效很好。

1985年11月地质矿产部在昆明召开了会议，制定了饮料矿泉水标准，后来又与轻工业部和卫生部联合制定了饮料矿泉水国家标准。其中界定的饮料矿泉水特殊化学成分的标准是：游离二氧化碳 > 250 mg/L，偏硅酸 > 25mg/L，锂 > 0.2mg/L，锶 > 0.2mg/L，溴 > 0.2 mg/L，碘 >0.2mg/L，钼 >0.05mg/L，锌 >0.2mg/L，硒 >0.01mg/L。目前的饮用矿泉少量为温泉或微温泉，大部分却是冷泉。

二　温泉的形成

温泉水形形色色，多种多样，它们是怎样形成的呢？许多到过温泉地区旅游、沐浴、疗养和治病人常常说，某某温泉周围有着浓烈的硫磺味。硫磺和火山关系密切，因此他们就联想到温泉可能是地下岩浆中所含的水流到地表而形成的。这种想法在地质学家中也流行了相当长的时期。因为，他们注意到，在高温地热水中所含有的Li、Rb、Cs、B、F、As、CO_2、H_2S也是岩浆气体中常常含有的成分，特别是岩浆活动晚期的残浆和气体中常常含有这些成分。基于此，他们就认为高温泉水常常是岩浆所带来的。可是，野外考察的结果发现，许多温泉旁边并没有火山活动，也难说地下深处还有强烈的岩浆侵入活动。到20世纪60年代初期，有人对水的氢氧同位素做了许多研究工作后，改变了这样的看法。大家知道，水是由两个氢原子和一个氧原子构成的。在自然界中，水以四种形式存在，即$H_2{}^{16}O$、$H_2{}^{18}O$、$H_2{}^{17}O$和HDO。在海水中这四种水的比率是100 000∶2 000∶420∶316。1963年有人研究了地热水中的氢氧同位素，发现大多数地热区中温泉水的重氢（D）的含量差不多是一个常数，并等于大气循环中的大气水中重氢（D）的含量。可是地热水中^{18}O的含量变化则比较大，它们在地热

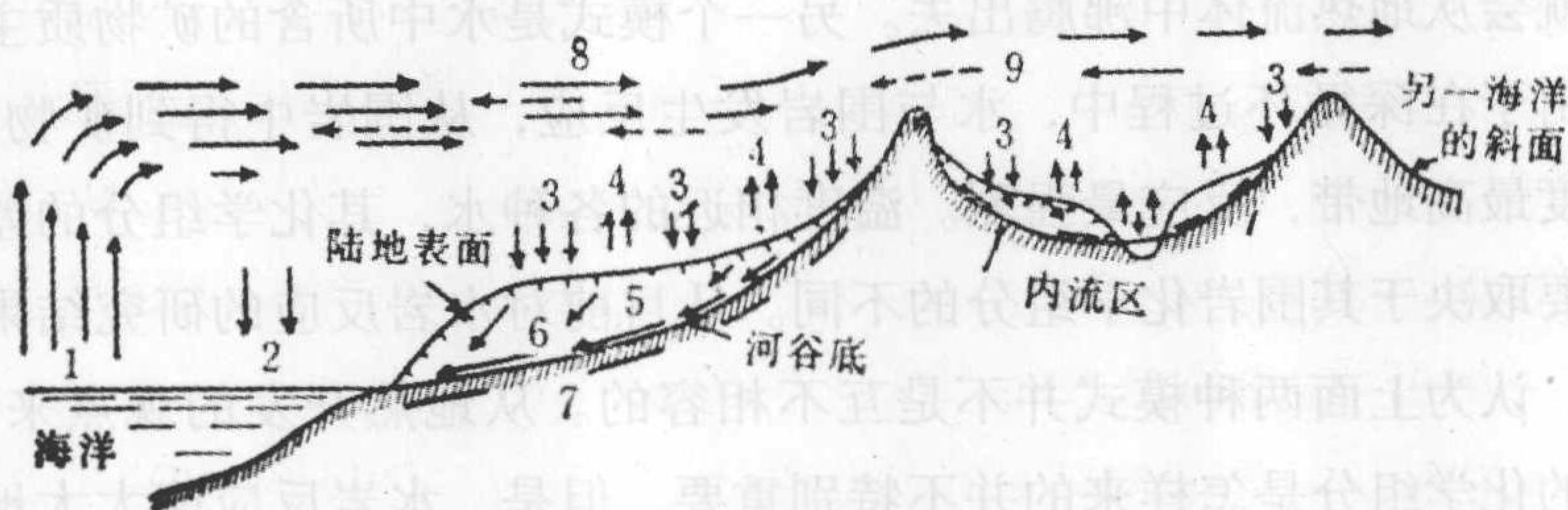


图 8—1　自然界大气水的循环

1. 洋面蒸发；2. 洋面降水；3. 陆地降水；4. 陆地蒸发；5. 地下水；6. 河流水；7. 地下径流；8. 向陆地运行的水气；9. 来自另一海洋和陆地蒸发的水气

水中大大地富集起来。这是因为当水通过岩石时，岩石中的重氢（D）含量很少，而 ^{18}O 的含量很高，当地热水接触岩石时，水和岩石之间发生了氧同位素交换的结果。

氢氧同位素组分的研究说明，地下热水中水的来源主要是大气水。如果有岩浆水的话，也不会超过5%。大气水循环过程中（图 8—1），一部分渗入到地下深处被加热，同时化学成分也发生明显的变化，形成了温泉水。一般情况下，大气水的矿化度是很低的，也就是说溶解在大气水中的矿物质是很少的。但是，当它们在地下循环时，随着温度的升高，水和岩石相互发生作用，一部分形成岩石的元素溶解到水中，如 Si、Al、Na、K、Ca、Mg、I 和 Mn，另外还有一些不是形成岩石的可溶元素也加入到温泉水中，如 Cl、Br、B、H、O 和 As 等。这些元素加入到热水之中可能是通过两种方式进行的（图 8—2）。第一种方式是深循环的水从岩浆溶液中直接得到热量和溶解组分，因为下渗的水可以通过扩散作用进入和穿过岩浆体。当它们返回到地表时，逐渐变冷，就会发生沉淀作用，水中所含的挥发物质和蒸汽在地表附

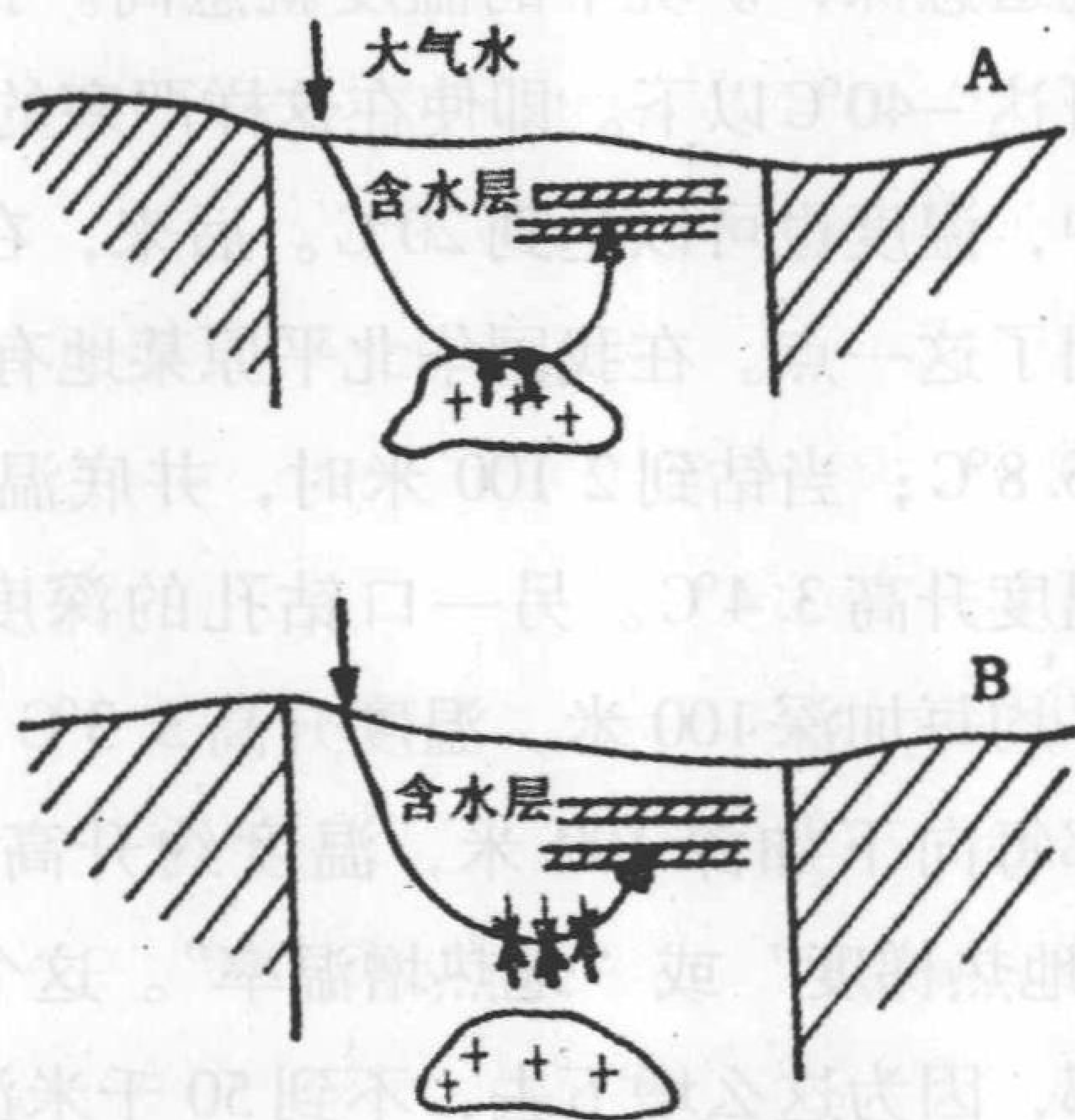


图 8—2　地热水中化学成分和热来源的两种模式

近就会从地热流体中沸腾出去。另一个模式是水中所含的矿物质主要是由于在深循环过程中，水与围岩发生反应，从围岩中得到矿物质。温度最高地带，反应最强烈。温度相近的各种水，其化学组分的差别主要取决于其围岩化学组分的不同。从目前对水岩反应的研究结果来看，认为上面两种模式并不是互不相容的。从地热开发的观点来看，水的化学组分是怎样来的并不特别重要。但是，水岩反应能大大地影响地热流体的组分，这是个很实际的问题。然而，从图8—2看来，这两个模型不管是哪一个，都承认高温的热泉下面可能都存在正在冷却的侵入体，来作为这些温泉的局部热源。当然，应该指出，并不是任何时代的侵入体都可能成为高温温泉的局部热源。因为一个侵入体的温度一般为850℃~1 100℃。这样的温度值不可能保持太长的时间，慢慢就会变冷。如果侵入体的年龄比较老或者体积比较小，就冷却比较快。目前有人认为，在上新世以前侵位的侵入体，不管它的规模有多大，都已经冷却了，这时它们就再也不能构成高温温泉的局部热源。

在现在的活火山区或在地下存在年轻侵入体的地区，温泉的热来自下伏深埋的岩浆囊，这是确定无疑的。但是还有许多温泉，出现在没有火山和岩浆活动的地区，那么，往下循环的大气水又是怎样变热的呢？答案很简单，因为地球内部是热的。关于这方面的感受，我们的祖先在很早以前就已经知道了，特别是那些矿工，在采矿时就发现，坑道愈深，矿坑中的温度就愈高。我国黑龙江冬天是冰天雪地，气温可达-40℃以下。即使在这样严寒的季节，在鹤岗煤矿300米深的矿坑中，温度也可以达到20℃。后来，在钻井中进行温度测量，结果也证明了这一点。在我国华北平原某地有一钻孔，在1 000米深处，温度为46.8℃；当钻到2 100米时，井底温度为84.5℃。平均每加深100米，温度升高3.4℃。另一口钻孔的深度达5 006米，井底温度为180℃，平均每加深100米，温度升高3.3℃。世界上许多钻孔也证实，地球内部每向下加深100米，温度约升高2.5℃~3℃。在地质学上称它为“地热梯度”或“地热增温率”。这个增温率不能保持到地球很深的内部，因为这么增下去，不到50千米深处就会达到岩石熔融的温度，而地球中心的温度差不多就要达到200 000℃。现在根据地球物理研究的

结果推测地球内部的温度只有3 100℃，在地壳底部和地幔上部温度约为1 100℃ ~1 300℃。在地壳内部，只有上部1.5 千米之内增温率才为30℃/km，15 千米处下降到20℃/km，25 千米以下下降到15℃/km，再往下就下降到8℃/km。地壳上部温度比较高，可能与地壳上部主要由花岗岩层组成有关。花岗岩中常常含有较多放射性元素，它们主要是^{238}U、^{235}U、^{232}Th和^{40}K。它们产生的热量每年为20.93×10^{20}焦耳。

地球内部是热的，其热源除了上述放射性元素的放射热以外，地球收缩的重力能也是一种长期的有效的热源。地球的半径收缩1 厘米，放出的热量为33.49×10^{22}焦耳。由于地球的总热容量为6.3×10^{27}焦耳/℃，地球的平均温度应该上升5×10^{-2}℃。此外，还有一些次要的热源，如化学反应热、潮汐摩擦热等。但是，从地球内部通过传导排放的热量中，五分之四是由放射性同位素的锐变所释放的能量提供的。

由于地球内部是热的，当大气水向下渗入到地壳内部时，就会从周围的热岩石中吸收热量。特别是有大断裂存在时，大气水会沿断裂下渗很深，所吸收的热量会很大。如果水的循环深度达到5 000 米，地面年平均温度为20℃，在地下5 000 米深处，水的温度就可以达到170℃。如果有适宜的通道供它返回地表时，向上运移过程中会因传导作用而冷却，在地表当然不会出现170℃的泉，但也有可能出现与当地高程的沸点相对应的沸泉。然而，在无天然的岩浆热源的地区，又无适宜的构造条件时，在地表出露的常常是大量的热泉、温泉或微温泉。

温泉水既然是大气水在地下经过长途循环之后再返回到地表而形成的，那么，它们在地下走了多长时间呢？目前通过氢的放射性同位素氚的研究能给予回答。氚的半衰期为12.5 年，它们在大气水中能形成，主要是靠大气圈中宇宙射线的轰击而发生的核反应产生的，所以在自然界的含量很微弱。但是，近年来由于大量人工热核爆炸的结果，氚的含量大大增加。通过测量地热水中氚的含量就能知道大气水是什么时候渗入到地下的。如果热泉水中含有高的氚值，就说明它是含有比较年轻的水，也就是说，大气水在地下旅行的时间不长。

结果推测地球内部的温度只有 3 100℃，在地壳底部和地幔上部温度约为 1 100℃～1 300℃。在地壳内部，只有上部 1.5 千米之内增温率才为 30℃/km，15 千米处下降到 20℃/km，25 千米以下下降到 15℃/km，再往下就下降到 8℃/km。地壳上部温度比较高，可能与地壳上部主要由花岗岩层组成有关。花岗岩中常常含有较多放射性元素，它们主要是 ^{238}U、^{235}U、^{232}Th 和 ^{40}K。它们产生的热量每年为 20.93×10^{20} 焦耳。

地球内部是热的，其热源除了上述放射性元素的放射热以外，地球收缩的重力能也是一种长期的有效的热源。地球的半径收缩 1 厘米，放出的热量为 33.49×10^{27} 焦耳。由于地球的总热容量为 6.3×10^{27} 焦耳/℃，地球的平均温度应该上升 5×10^{-7}℃。此外，还有一些次要的热源，如化学反应热、潮汐摩擦热等。但是，从地球内部通过传导排放的热量中，五分之四是由放射性同位素的衰变所释放的能量提供的。

由于地球内部是热的，当大气水向下渗入到地壳内部时，就会从周围的热岩石中吸收热量。特别是有大断裂存在时，大气水会沿断裂下渗很深，所吸收的热量会很大。如果水的循环深度达到 5 000 米，地面年平均温度为 20℃，在地下 5 000 米深处，水的温度就可以达到 170℃。如果有适宜的通道供它返回地表时，向上运移过程中会因传导作用而冷却，在地表当然不会出现 170℃的泉，但也有可能出现与当地高程的沸点相对应的沸泉。然而，在无天然的岩浆热源的地区，又无适宜的构造条件时，在地表出露的常常是大量的热泉，温泉或微温泉。

温泉水既然是大气水在地下经过长途循环之后再返回到地表而形成的，那么，它们在地下走了多长时间呢？目前通过氚的放射性同位素氚的研究能给予回答。氚的半衰期为 12.5 年，它们在大气水中能形成，主要是靠大气圈中宇宙射线的袭击而发生的核反应产生的，所以在自然界的含量很微弱。但是，近年来由于大量人工热核爆炸的结果，氚的含量大大增加。通过测量地热水中氚的含量就能知道大气水是什么时候渗入到地下的。如果热泉水中含有高的氚值，就说明它是含有比较年轻的水，也就是说，大气水在地下旅行的时间不长。

第九章

中国的温泉

中国温泉有多少？这确实是个谜，谁也说不准。

1908年田北湖撰《温泉略志》，载温泉140处。1919年苏莘写《论中国火山脉》，附各省温泉表，载火山成因温泉74处。1926年章鸿钊根据《方舆纪要》和各省通志，分别辑录，计得温泉500余处。1939年陈炎冰著《中国温泉考》，所记温泉584处。1956年章鸿钊所著《中国温泉辑要》由地质出版社增订再版，所记温泉972处。

20世纪70年代，大部分省区做了地热普查工作，到70年代末期，全国温泉总数增至2 000多个。然而，这个数值明显偏低。根据北京大学地质学系地热研究室、中国科学院青藏高原综合科学考察队、中国人民解放军00939部队在青藏高原和横断山区的考察，仅这一地区的温泉总数就达1 600个。估计全国温泉总数应介于2 500～3 000之间。1986年中国能源研究会地热专业委员会统计，全国温泉总数3 398个，内含台湾94个。

全国温泉总数不准确，实有许多原因。如：（1）当时许多省区尚未进行实地调查，统计数字不可靠；（2）调查者缺乏正确的温泉概念与统一的认识。地表上的一些温泉，彼此相接不远，地下同源，本当归为一泉，但是常常是地表几坑就算几个泉；（3）数中包括许多钻孔，然而一个热田可钻多孔，不能将一个钻孔算作一个温泉，更不应该将钻孔对流排放的温度当成温泉的温度；（4）有些人道听途说做文章，以讹传讹。

根据目前确凿的资料，中国温泉最集中分布的地区，应该首推云南省和西藏自治区、次为广东、福建。但是按一个省、市、自治区的温泉密度来说，密度最大的是台湾。

按照《西藏温泉志》的统计，西藏自治区的温泉总数为677个，但是，该书中计入了9个从地形图上查出来的标有“毒”字的“毒泉”和24个只见泉华已经没有泉水外溢的“温泉遗迹”，实际的温泉数应该是644个。其中：阿里地区88个、日喀则地区117个，那曲地区186个，大

拉萨市34个，山南地区44个，林芝地区49个，昌都地区126个。从地质构造上来说，它们主要分布在雅鲁藏布缝合线的南北两侧，往北进入羌塘高原，往南越过喜马拉雅山脉温泉数量顿减。在西藏高原，海拔平均为4 000余米，沸点很低，均在86℃左右，而年平均气温在0℃左右，按照比较科学的定义，温度达到8℃的泉就会向周围放热了，就可以叫做温泉。西藏的沸泉区（≥86℃）共有45个，占温泉总数的7%；热泉区（<86℃～45℃）178个，占温泉总数的28%；温泉区（<45℃～35℃）295个，占温泉总数的46%；微温泉区（<35℃～8℃）126个，占温泉总数的20%。西藏的沸泉主要出露在雅鲁藏布缝合带附近，其中日喀则地区18个、阿里地区10个、山南地区7个、拉萨市6个、林芝地区2个，那曲地区2个。热泉最多在那曲地区，达49个，日喀则地区次之，为32个，昌都地区有27个，林芝地区有20个。这4个地区占了热泉总数的73%。温泉集中分布在那曲地区（98个）和昌都地区（65个）的三江流域的上游地段，它们占全自治区温泉总数的55%。另外温泉比较多的还有日喀则地区（52个）和阿里地区（35个）。微温泉最多也是在那曲地区（36个）和昌都地区（34个）。1973年至1976年中国科学院青藏高原综合科学考察队在西藏曾实地考察了354个温泉，并进行了取样分析。发现西藏的大部分沸泉都是排放富硼的氯化钠型水或受冷水不同程度掺和的氯重碳酸钠型水或重碳酸氯钠型水。西藏的温泉无论温度的高低，其矿化度都比较高，然而随着重碳酸组分的增加，其矿化度会下降。

云南省是我国温泉最多的省份，泉温>25℃的温泉达到862个，其中沸泉19个，热泉314个，温泉208个，微温泉321个。云南的19个沸泉全部出现在红河断裂带以西。其中临沧地区6个，保山地区和德宏州各4个，西双版纳州3个，此外还有思茅地区澜沧县的云南城和红河边的金平县勐坪热水塘。在云南的这些沸泉中，除了腾冲县境的热海地热田是排放氯化钠型以外，其余的沸泉都是排放重碳酸钠型水。但是不管是哪种水型的沸泉，都有着高的氟含量和低的硼含量。而且，随着温度的下降，温泉水的化学类型也变为重碳酸钙型或重碳酸镁型。云南省的沸泉除了腾冲热海等排放的氯化钠型水其矿化度超过1g/L外，其余均

<1g/L，即大部分为淡水。即使一些含重碳酸钠型水的沸泉也不例外。根据大地电磁测深的探测，腾冲热海地热田地下7千米深处可能有着一个尚未完全冷却的岩浆囊（图9—1）。其视电阻率很低，共有5Ω·m。

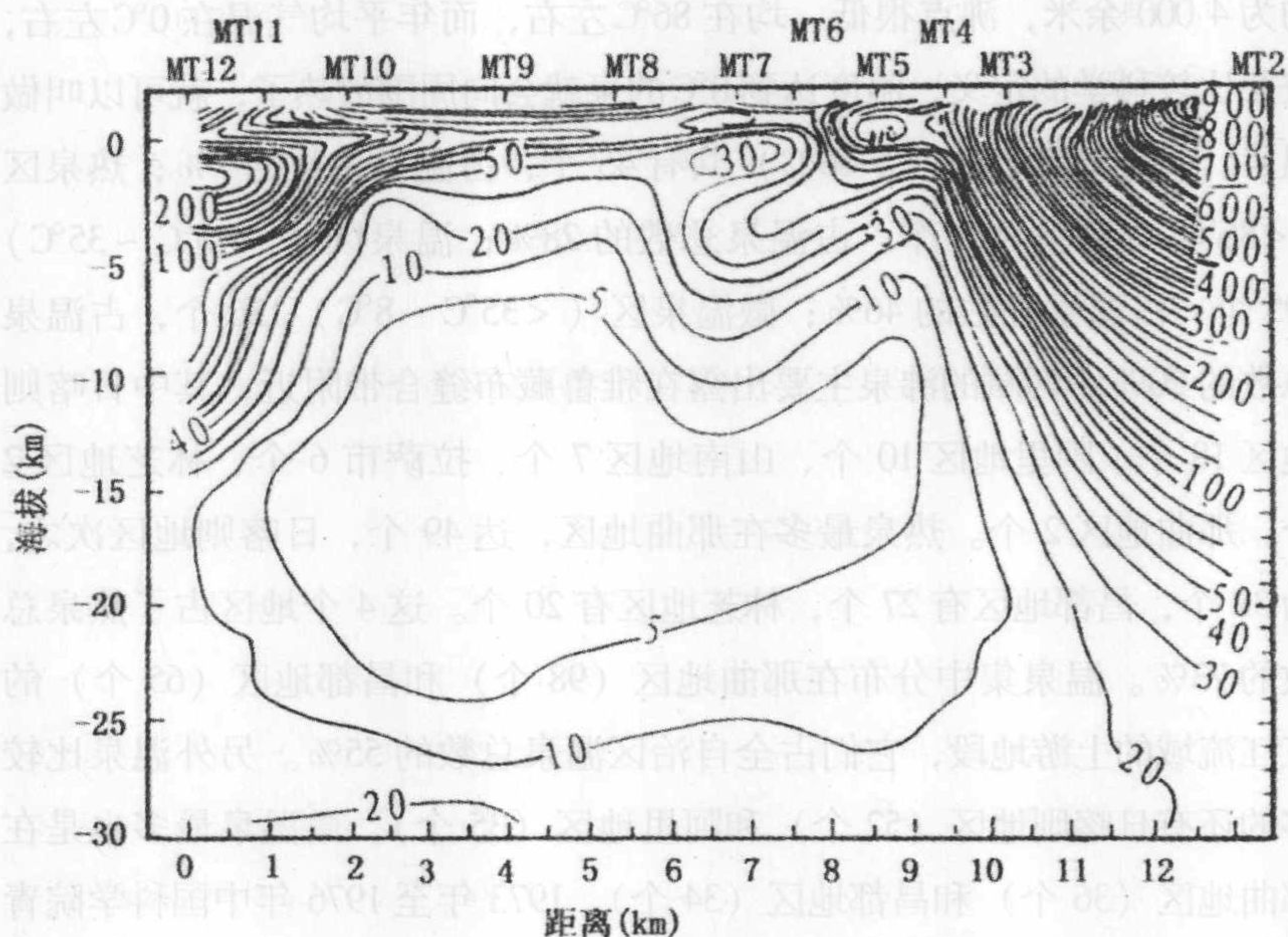


图9—1　云南腾冲热海地热田一维视电阻率剖面（单位Ω·m）

四川西部（包括甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、凉山彝族自治州和攀枝花市）实际上就是青藏高原的东部，那里共有温泉290个，主要分布在甘孜藏族自治州，该州温泉205个，其中沸泉7个，在这些沸泉中只有康定县的榆林宫沸泉排放重碳酸氯化钠型水，其余沸泉，包括巴塘县的茶洛间歇喷泉，都是排放重碳酸钠型水。阿坝藏族羌族自治州虽然只有20个温泉，但是却有沸泉一个，沸泉区海拔4 500米，泉温85℃，也是排放重碳酸钠型水，矿化度<1g/L。阿坝州的温泉大部分都是微温泉（14个）。凉山彝族自治州的55个温泉，温度最高的只有75℃，出现在南华县。

青海省位于青藏高原的北部，共有温泉52个，其中温度高于80℃的有4个，温度在61℃~79℃有6个，41℃~60℃有10个，20℃~40℃达19个，<20℃的矿泉有9个，还有3个情况不明。在高于80℃的

4个温泉中，温度最高的是贵德县的热水沟，达到93.5℃。最特殊的是昆仑山布喀达坂峰（6 860米）东坡两侧第二条山谷冰川前缘的冰水沉积平原上部的一个沸泉，它是1990年可可西里考察时发现的，泉区的面积达1 000平方米，温度>85℃的沸水从冰水沉积物的砾石层喷涌而出，生鸡蛋放入沸水中很快就煮熟了。泉区仅少量泉华沉积物，热水流出不远即渗入地下，在冰川堆积的扇形地的下缘又以温泉溢出。沸泉排出的泉水矿化度却十分低，好像是被蒸汽加热的淡水。

东南沿海省是我国温泉集中分布的另一个区域，就其数量来说首推闽粤两省，但就温泉分布的密度来说首推是台湾。

广东省于1968年完成了全省热矿水的普查工作，统计出全省（含海南岛）共有地热水出露点214处。根据1983年的《广东省温泉总汇表》，全省已查明的泉水温度≥25℃的温泉257处。温度>80℃者共有16处，占全省温泉总数的6%；>60℃~80℃者有70处，占28%；>40℃~60℃者共113处，占44%；25℃~40℃者共58处，占22%。广东省温泉的分布有162处很明显地受控于断裂带，主要受6条北东向断裂控制的有96处，66处受两条东西向断层控制。这些受构造控制的单泉或泉群自流量一般比较小，大多数<500m³/d；个别的达到3 000m³/d（恩平金山温泉群）。一些隐伏的地热田规模比较大，如湛江地热田地热水资源量为27万m³/d，茂名地热田为11.6万m³/d。广东省的高温温泉，天然露头的温度最高为97℃（阳江横岗仔），钻探取得的最高温度为102℃。如阳江横岗仔钻孔深度309米，孔内温度104℃，孔口温度102℃。潮安东山湖，天然露头温度82℃，孔深227米，孔内温度104℃，孔口温度102℃。广东境内地热钻孔的孔深最大者在丰顺邓屋，泉温88℃，孔深806米，孔内温度94℃，孔口92℃。

海南省共有温泉30个，34℃~40℃的有4处；40℃~60℃有16处；60℃~80℃有9处；>80℃的有2处，它们是保亭县七仙岭热泉（94℃）和儋州市兰洋农场热泉（82℃）。

根据1985年《福建省温泉总汇表》，全省的温泉≥25℃者共187处。2010年在庄庆祥编汇的《福建省温泉一览表》中，列出温泉215处，但是在表中有31个是钻孔资料，实际上天然排放的温泉共184个。

其中：>80℃的温泉有8个，占温泉总数的4%，天然露头的最高温度为89℃（德化县南埕）；61℃~80℃的温泉共36个，占温泉总数的20%，其中有2个温泉的温度恰恰是80℃；41℃~60℃的温泉91个，所占百分比为50%；25℃~40℃的温泉49个，约占27%。在表列中的31个钻孔，温度最高的为漳州地热田范围内漳州五中内的第二开采孔。该孔钻入花岗岩裂隙，1989年时孔口水温为114℃，到1992年后上升到122℃。对于漳州地热田的热储温度，有人利用钠钾地球化学温度计和钠钾钙地球化学温度计计算得为130℃，有人利用二氧化硅地球化学温度计计算得140℃，为一个中温地热系统。

台湾省是我国温泉密度最大的省份，单位面积的温泉数达35.6，为全国第一，高于云南（21.08）、广东（15.67）和福建（15.3）。因此，台湾省面积虽然不大，但全省处处有温泉。总数介于80~100个以上。泉水的温度局限于38℃~70℃和84℃~99℃两个区间。高温沸泉主要出现在台湾省北端的大屯火山区、宜兰龟山岛和中央变质带内的土场、清水溪、庐山和利稻。另外，章鸿钊先生根据日本人资料，在台湾南部列出5个高于100℃的泉，如屏东的来布安（120℃）、托那（140℃）、拉库司（120℃）、宝来（100℃）及拓比牙（100℃）。这应该是一个错误。因为按热力学观点，温泉的沸点温度是受高程控制的，地表不可能出现高于100℃的温泉。宝来温泉的温度实际上只有62℃，托那温泉的温度仅57℃，它相当于134.6℉。该值接近于140℉。因此，可能是误将℉改成为℃。台湾的温泉，只有大屯火山区的温泉排放氯化钠型水或酸性硫酸盐型水，其余温泉包括中央变质带的沸泉均排放重碳酸钠型水。

温泉总数超过100个的还有湖南省。泉水温度超过23℃的天然露头有138个，其水温一般在40℃~60℃之间。温度超过80℃泉区仅两个，即灰汤和汝城。灰汤热泉自流量不大，天然露头的温度为83℃。

温泉较多，且经过详细调查的省份还有江西、湖北、辽宁和河北等。江西温泉的天然露头共94个，其中一半以上水温在40℃~60℃之间，最高温度为82℃。湖北温泉有44处，其中7处水温为60℃~

70℃，有15处温度为40℃～60℃。辽宁的温泉有47处，集中于辽东地区，其中有著名的鞍山汤岗子温泉（70℃）、盖县熊岳温泉（55℃）、丹东五龙背温泉（71℃）。河北温泉31处，其中水温＞45℃的热泉有13处，最高的泉温为78℃。山东的温泉主要集中在山东半岛，共17处。温度最高的招远热泉温度达88℃。青岛即墨温泉泉口水温＞80℃。

在中国其他省和自治区，温泉的数量相对较少，温度也比较低。其中特别值得一提的是陕西，虽然它的温泉的天然露头不多，仅14个，但是，陕西是我国开发地热最早的地方，最著名的华清池，作为皇家园林开发就有3 000多年的历史。近年来在渭河平原为开发地热在渭南、咸阳打了不少钻孔，取得了很好的结果，如在渭南市火车北站钻了一口3 806米的深井，井口水温123℃，出水量278m^3/h，被称为"陕西第一地热井"。比较有意思的是内蒙古自治区的著名疗养胜地阿尔山温泉疗养院，泉区共有泉点48个，然而超过40℃的仅有4个，最高温者为49℃，有36个泉介于10℃～40℃。总体呈北西向排列，排放重碳酸钠型水。内蒙古自治区另一个重要的温泉是赤峰市宁城县温泉，天然出露两个热泉，近东西向排列，相距160米，水温60℃～85℃。自1972年以来就钻了31个孔，测得最高温度为99℃。

另外，在我国东部辽阔的大平原区，如华北平原、东北平原、江淮平原和江汉平原以及汾渭地堑等地，地面虽无温泉出露，但平原之下同样蕴藏着丰富的地下热水。如冀中凹陷，在20世纪70年代就打了91口热水井，它们分别居于4个不同的地下地热田中。其中马16井，井深2 700米，产水层为位于2 100米处的蓟县系雾迷山组，日产水量为2 050方，井口水温为118℃。关于这些盆地的地热资源状况，我们将在下面地热能部分详细介绍。

如果把中国温泉分布图（图9—2）与中国新生代火山分布图和中国地质构造略图比较一下就会发现，温泉与地质构造的关系十分密切，而与新生代火山似乎有着若即若离的关系。

在西藏南部，所有的沸泉和大部分热泉都分布在雅鲁藏布江的南北两侧。雅鲁藏布缝合线是自白垩纪末期以来两个大陆板块相撞的地

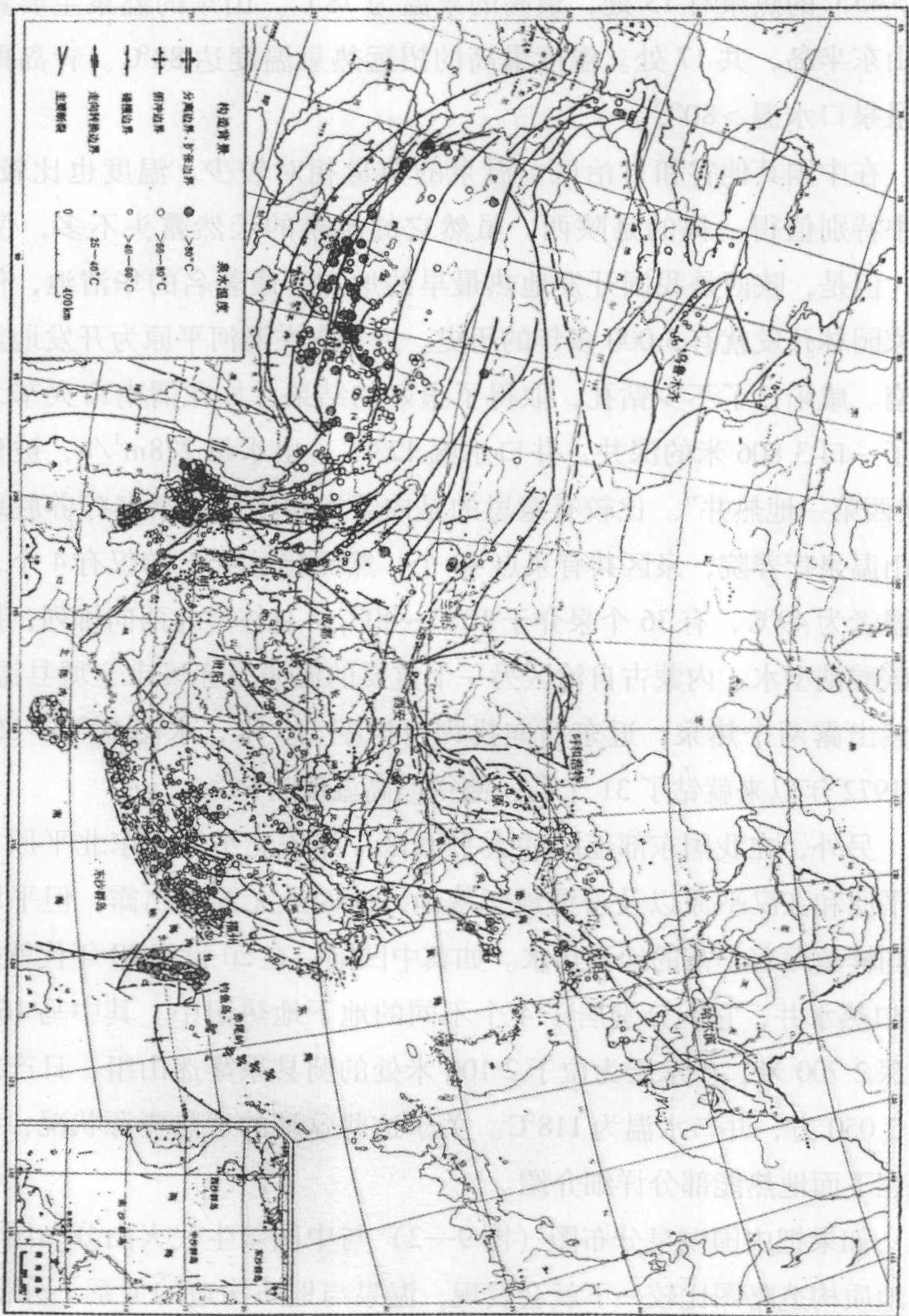


图9—2 中国温泉分布略图（据陈墨香等，1994）

方。强烈的地热活动出现在缝合线两侧，同时这里又没有新近纪以来的火山活动，这是与西太平洋岛弧的地热活动情况明显不同的地方。西藏南部的地热活动往北进入羌塘高原就明显减弱。说明这些地热活动与藏北高原出现的强烈的新近纪以来的火山活动没有关系。西藏南部的地热活动在喜马拉雅山脉主脊线以南也明显减弱，说明它们的活动与两个大陆板块碰撞之后仍在互相作用密切相关。因为当两个大陆壳直接相撞以后，南部的陆壳，由于浮力不能下插到下部的陆壳之下，北部的陆壳只好向南仰冲，出现了一系列平行于喜马拉雅山脉的推覆构造（又叫薄皮构造），由于陆壳间的摩擦，下面地壳可能发生局部熔融。在强大的挤压力之下，熔融的花岗岩浆不能上侵到地表。在喜马拉雅山脉主脊线以北的地区，它们可能还埋在地下，就形成了许多高温地热区的热源，这是西藏南部温泉多、温度高的原因。而且，西藏南部这些深埋的花岗岩，含硼很高，所以西藏南部的高温热水也是富硼的氯化钠型水。

在云南西部，怒江断裂带以西的腾冲和德宏州地区，温泉密集，仅腾冲一县就有58个热泉群，而且温度高。腾冲的高温热泉与更新世的火山活动到底有什么关系？腾冲热海地热田喷出的是贫硼的氯钠型水，美国地热界的泰斗D.E. White把这种水称为火山水，热田本身位于一个环形构造内，根据大地电磁测深资料，地热田下部7千米深处存在一个视电阻率极低带，很可能就是该地热田的岩浆热源。也是云南省唯一一个有着岩浆热源的地热区。在云南西部其他地区，高温沸泉区主要沿高黎贡山变质带、澜沧江断裂带旁侧的临沧花岗岩带和哀牢山变质带分布，在这三个隆起带之间的保山地块与兰坪—思茅地块，温泉数量相对较少，温度也偏低。但是，除了热海地热田以外，其他温泉不管温度的高低，它们都不是排放氯钠型火山水。温度高的温泉排放重碳酸钠型水，温度低的温泉则排放重碳酸钙镁型水。而且这些温泉的分布明显受断裂带控制。

台湾岛是西太平洋岛弧带的一段，有着强烈的地热活动。大屯火山区附近和宜兰龟山岛等地的沸泉、喷气孔和硫质气孔，看来与岛弧带新生代以来强烈的安山质火山活动密切相关。溢出的水也是与火山

活动密切相关的氯钠型水。沿着中央山脉的变质带也有强烈的地热活动。台湾地热专家陈肇夏在他的专著中写道："活火山区或第四纪火山区出现高温温泉并不稀奇，比较奇特的是在面积不大的台湾中央山脉变质岩区竟然有70处以上的温泉分布、而且其中不乏90℃以上的温泉，其地下热水温度更高达150℃～232℃，最主要的原因就是中央山脉在这几百万年内的快速上升和侵蚀（5～10cm/a）。快速上升结果使得原本在地壳深处温度较高的岩层得以抬升到地壳浅处，且在一段时间内仍能保有部分余温，因而造成较高的地温梯度。而快速侵蚀结果则造成起伏极大的地形，使得地表水有机会深入地下，被异常的地温加热，然后再升至地表形成高温温泉"。

在福建和广东，温泉总数虽达480多处，温泉的温度由海滨向内陆逐渐降低。它们在地质构造上不是处在活动的大陆边缘，没有强烈的大面积的安山岩浆的喷出，只有少量的更新世玄武岩沿断裂溢出。断裂构造发育，地震活动只有浅源地震，震源面可能向海倾斜，不具备形成浅部岩浆热源的条件，温泉的分布明显受断裂的控制。该区虽有大规模的中生代岩浆活动（包括侵入岩和火山岩），但其岩浆源早已冷却，不能构成该地区地热活动的热源。在临海的一些热泉区，虽然也排放氯化钠型水，但很可能是邻近的海水补给的。

在中国大陆内部，沿着天山山脉、祁连山、大别山、宁镇山、吕梁山、太行山、秦岭和燕山山脉，以及辽东半岛和山东半岛，也出露一些热泉。然而其数量少、温度低，它们都是大气降水沿着断裂带深循环而形成的。在华北平原和四川盆地，沿着盆地的底盘上穹的地带，也蕴藏着丰富的地下热水，有些还可能是古老的埋藏水。

在华北和东北，古近纪以来虽然也有过强烈的岩浆活动，喷出了多期的玄武岩，但是它们的岩浆源都比较深，而且玄武岩的黏度比较低，不容易在地壳浅部滞留下来形成岩浆囊，没有可能形成这个地区地热活动的热源。

总之，中国温泉的分布主要受地质构造的控制，高温地热活动区分布于中国西南西藏和云南以及台湾等板块的边界附近，这里可能有年轻的岩浆活动，成为地热活动的热源。在中国大陆内部的地热活动

主要是沿断裂带深循环形成的。

表9—1是中国各个省、自治区的温泉数，即已有的地热井数统计表。

表9—1　中国各省、市、自治区温泉地热井统计

省、市、自治区	温泉数	面积（万平方千米）	单位面积温泉数	地热井数	省、市、自治区	温泉数	面积（万平方千米）	单位面积温泉数	地热井数
北京	3	1.7	1.76	300	天津	0	1.2		251
河北	25	19	1.32	200	山西	7	16	0.44	220
内蒙古	6	118	0.05	1	辽宁	36	15	2.4	10
吉林	6	19	0.32	5	黑龙江	0	46		18
江苏	5	10	0.5		上海	0			
浙江	6	10	0.6		安徽	18	14	1.29	
福建	172	12	14.33	94	江西	82	17	4.82	22
山东	17	16	1.06	100	河南	23	17	1.35	300
湖北	53	19	2.79		湖南	130	21	6.19	76
广东	282	18	15.67	15	广西	35	24	1.86	10
海南	35	3.4	10.29	60	川、渝	305	49、8.2	5.53	3
贵州	72	18	4.0	40	云南	822	39	21.08	230
西藏	306（644）	123	2.49（5.24）	60	陕西	14	21	0.67	186
甘肃	14	43	0.33	3	青海	44	72	0.61	10
宁夏	2	6.6	0.37	2	新疆	62	166	0.37	8
香港					澳门				
台湾	128	3.6	35.56	15	合计	2710			2239

表中温泉数与地热井数取自文冬光等所编著的《中国地热资源管理信息系统》（2010）。表中西藏括号内的温泉数取自《西藏温泉志》。

主要是沿断裂带深循环形成的。

表9—1是中国各个省、自治区的温泉数，即已有的地热井数统计表。

表9—1　中国各省、市、自治区温泉地热井统计

省、市自治区	温泉数	面积（万平方千米）	单位面积温泉数	地热井数	省、市自治区	温泉数	面积（万平方千米）	单位面积温泉数	地热井数
北京	3	1.7	1.76	300	天津	0	1.2		251
河北	25	19	1.32	200	山西	7	16	0.44	220
内蒙古	6	118	0.05	1	辽宁	36	15	2.4	10
吉林	6	19	0.32		黑龙江	0	46		18
江苏	5	10	0.5		上海	0			
浙江	6	10	0.6		安徽	18	14	1.29	
福建	172	12	14.33	94	江西	89	17	[illegible]	[illegible]
山东	17	16	1.06	100	河南	23	17	1.35	300
湖北	53	19	2.79		湖南	130	21	6.19	76
广东	282	18	15.67	15	广西	35	24	1.86	10
海南	35	3.4	10.29	[illegible]	四川	305	49	[illegible]	[illegible]
贵州	72	18	4.0	40	云南	822	39	21.08	230
西藏	306 (644)	123	2.49 (5.24)	60	陕西	14	21	0.67	186
甘肃	14	40	0.35		青海	44	72	0.61	10
宁夏	2	6.6	0.37	2	新疆	62	166	0.37	8
香港					澳门				
台湾	128	3.6	35.56	15	合计	2710			2239

表中温泉数与地热井数取自文冬光等所编著的《中国地热资源管理信息系统》(2010)，表中西藏括号内的温泉数取自《西藏温泉志》。

第十章

地 热 能

一　庞大的热库

常常听人说，地球是个庞大的热库！然而人们舒舒服服地生活在它的上面，并不感到是热的。人们有冷暖寒暑的感觉，这主要取决于太阳的热量。自从地球诞生45亿年以来，它一直受着太阳光照射而保持温暖，一切生命都依靠太阳能来维持，它把植物转换成化学能提供给人类。从最早有文字记载的历史时代起，人们就敬畏太阳的光辉，认为它是神灵，人们就开始认识到神秘的太阳对创造生命所起的作用。根据现代科学的计算，太阳每年供给地球整个表面热量达 23.61×10^{23} 焦耳，即236千万亿亿焦耳。地球表面每平方厘米每秒钟所得到太阳的热量为0.014 65焦耳，即146 500毫瓦／米^2。

随着人们生产过程中知识不断增长，人们才知道地球内部是热的，只是表面一层坚硬的冷的地壳把赤热的内心包裹起来了。前面说过，地球的核心温度高达3 000℃。地球内部的这种高温，它必然要向冷的地壳传递热量。传递的方式主要有三种：一是以传导的方式通过固体岩石向外传递；二是加热地下的流体，以对流方式向外传递；三是以岩浆向上移动的方式来传递。这三种传递方式分别称为大地热流、热泉活动和火山活动或岩浆侵入活动。

通过热传导作用，从地球内部向地球表面传递的大地热流量是岩石的热导率和地热梯度的乘积。因此，测量一个地区的大地热流量，必须首先测量观察点的地热梯度和地下岩石的热导率。现在已经知道，地球表面每年获得的大地热流量为 10.87×10^{20} 焦耳，这是从太阳获得的热能量的千分之一，但是大大超过火山和地震活动所释放的总能量。全球的大地热流平均值为63毫瓦/米^2。在地球表面，不同的地质构造区大地热流值的差别很大。在前寒武纪稳定地质区小于40毫瓦/米^2，新生代造山带大于80毫瓦/米^2，在大洋中脊上，由于海底扩张，从地幔上涌的炽热岩浆，使大洋中脊的热流值明显升高，可达100毫瓦/米^2。离开洋中脊，热流值逐渐降低到50～63毫瓦/米^2。在板块的另一侧是俯冲带，重的大洋板块俯冲到轻的大陆板块之下，在俯冲

的地方形成一个海沟。由于是冷的洋壳俯冲到地幔，使海沟地区热流值下降，常小于40毫瓦/米^2。当俯冲板块的前端进入轻的上覆板块之下以后，由于摩擦发生部分熔融，形成安山岩浆，并向上侵位或喷出，形成高热流区，热流值升高到125.6～209毫瓦/米^2。

20世纪60年代以来，中国科学院地质研究所开始从事大地热流测量工作，到1990年共发布的大地热流数据441个。1994年他们将我国分为五个大地热流构造区（图10—1），以西南构造区为最高达70～85毫瓦/米^2；西北构造区最低，为43～47毫瓦/米^2；华北—东北构造区为59～63毫瓦/米^2，与全国平均值接近；华南构造区平均热流值为66～70毫瓦/米^2，比全国平均值略高；中部构造区平均热流值为40～60毫瓦/米^2。西南地区，沿雅鲁藏布缝合线，热流值最高，达91～364毫瓦/米^2，向北随构造阶梯下降，到准格尔盆地只有33～44毫瓦/米^2，成为“冷盆”。台湾位于欧亚板块的东缘，热流值较高，为80～120毫瓦/米^2，越过台湾海峡，到东南沿海燕山期造山带，热流值降为60～100毫瓦/米^2，到江汉盆地只有57～69毫瓦/米^2。显示出由现代构造活动强烈的高热流地带向构造活动弱的低热流地带递变的特征。另外，在大型盆地中，大地热流值受基底构造形态的控制。隆起区热流值高，凹陷区则相对低。如华北平原，平均热流值为61.566～70毫瓦/米^2，变化范围为33.5～108.8毫瓦/米^2。热流值高的地段与平原下面凹陷最深、沉积最厚、反而又是地壳最薄、地幔上拱的地段相一致。那么，在中国960万平方千米的大地上，每年通过传导方式排放的热量是多少呢？如果中国的平均热流量也取66.98毫瓦/米^2，则排出的热量应为20.30×10^{18}焦耳/年，相当于燃烧了6 336亿吨标准煤释放出的热量。

通过温泉活动，以热水对流的方式流到地表的对流热量也可以计算。只要测量温泉的温度和流量以及知道当地的年平均温度就可以了。例如，一个温泉的温度是90℃，流量为1升/秒，当地年平均温度是15℃，水的比热是已知的，即使1克水升高1℃所需要的热量为4.186焦耳，则这个温泉排放出的天然热流量是313 950瓦，相当于9.92×10^{12}焦耳/年。如果我们假设中国2 500个温泉的平均温度为70℃，年平均温度取10℃，并假定泉的流量是1升/秒，则通过对流的方式放出

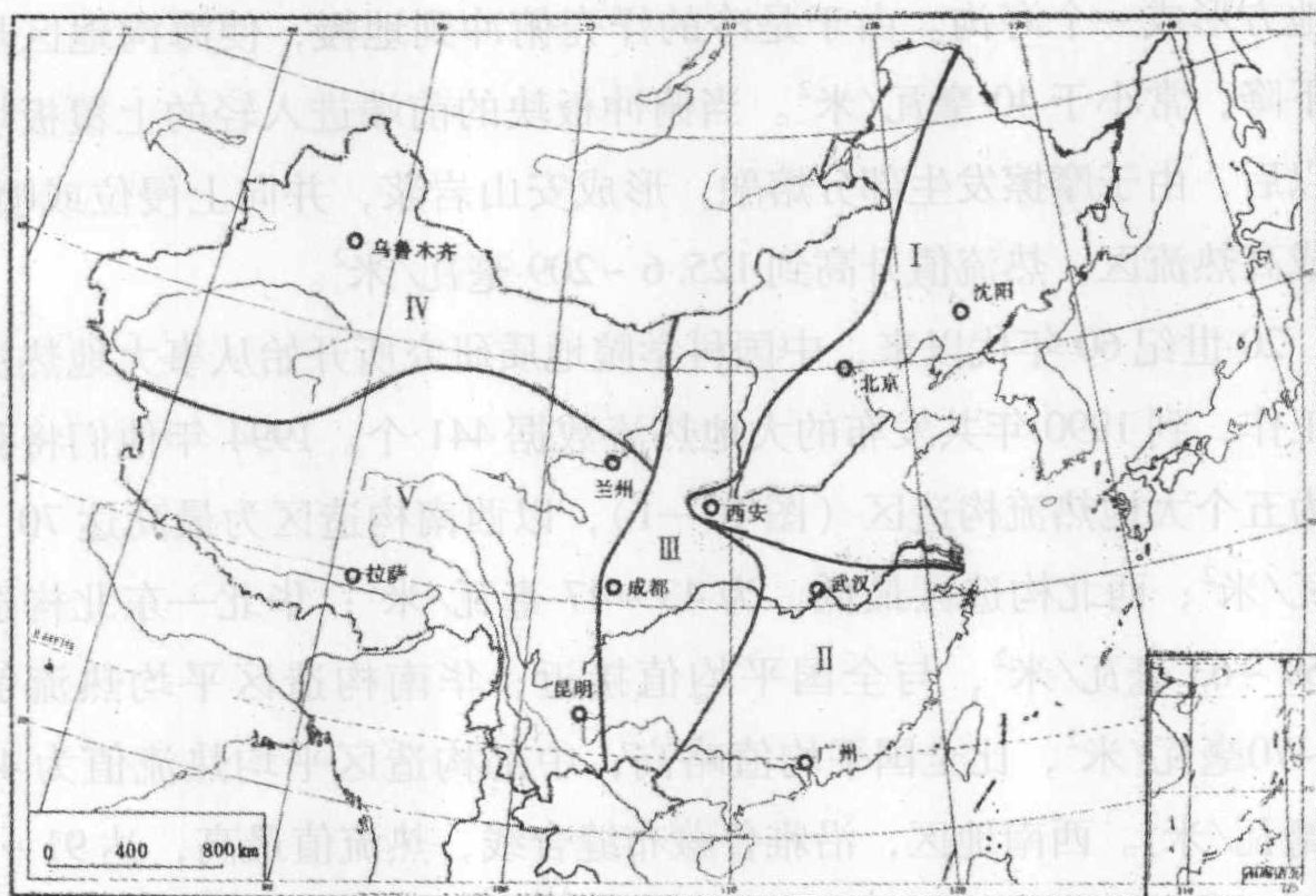


图 10—1　中国大地热流统计的构造分区图（陈墨香等，1994）。

I. 华北—东北构造区；II. 华南构造区；III. 中部构造区；IV. 西北构造区；V. 西南构造区

的热量为 19.67×10^{15} 焦耳/年，只相当于大地热流量的千分之一。造成这样大的差别，主要是由于地面上的温泉出露有限的缘故。

岩浆从上地幔穿过地壳到达地面形成活火山区。因为岩浆有850℃~1 250℃的高温，所以当火山喷出时也放出大量的热量。有人计算过，1883 年印度尼西亚喀拉喀托火山爆发时，抛出物的总量估计有18 立方千米，火山灰吹到了80 千米的高度，放出的热量为 7.2×10^{20} 焦耳。这样大量的能量仅仅是在两天的时间内以反复多次喷发的形式传到地球表面的，相当于每秒 41.65×10^{14} 焦耳。也有一些火山喷发的形式不一样，它仅是在平静地喷发，熔融的岩浆能在地球表面停留很长的时间。如夏威夷基拉维厄火山的哈利冒冒岩熔湖，火口直径 350 米。在岩熔湖中表面的岩熔冷却了，就沉到火口的底部，被下面新上来的热的岩浆又重新加热，然后再升到火口表面上来。从火口的岩浆表面传到大气空间的热量为 20.93×10^{6} 焦耳/秒，每年约为 6.28×10^{14} 焦耳。但是，活火山并不是在地球的各个角落都能出现的。那么，火山作用对整个地球的热量的散失有多大呢？如果我们假设地球在45 亿年的历史中，全部地球曾以熔融的岩熔升到地表。地壳的质量估计为

2.45×10^{25}克，一克岩熔从1 000℃冷却到0℃的热损耗量约为1 674.4焦耳，则地幔岩熔流平均每年的传输量为2.45×10^{25}克乘以1 674.4焦耳/克再除以45亿年，等于9.21×10^{18}焦耳/年。用整个地球表面积去除，则平均热流量只有0.569毫瓦/米^2。我国960万平方千米的土地上，火山放出的热量则是17.25×10^{6}焦耳/年，它们比大地热流值的百分之一还要小。因此，45亿年以来，火山活动从地球带出的热量与大地热流通过地壳传导出来的热量相比，也是微不足道的。

那么，地球内部的热含量有多少呢？这个问题也不难估算，只要知道地球内部的温度和地下物质的比热就行了。如果地球内部的平均温度为2 000℃，地球内部的平均比热推测为1.046 5焦耳/克℃，地球的质量为6×10^{27}克。这三个数的乘积就是地球的热含量，等于12.558×10^{30}焦耳。前面说过，地球表面通过传导而损耗的热量为10.88×10^{20}焦耳，因此地球内部的热含量是地球表面的热损耗量的100亿倍。这个估算表明，即使在下一个100亿年内，整个地球内部的温度由于变冷将达到目前地表的温度时，地球的热含量也能维持这100亿年内的大地热流量。另一方面，就目前地球内部所拥有的热含量也表明，地球内部的温度，自地球形成并固结以来，并没有发生多大的变化。

上述意见明显地说明，地球是一个庞大的热库。然而，地球内部具有这样巨大的热储量是否就是“取之不尽用之不竭”呢，回答却是否定的，笔者将在下一节中进一步讨论这一问题。

二　形形色色的地热系统

整个地球的含热量是那么的高，然而它深深地埋在地球的内部，不可能全部取出来。因为目前的钻探技术钻得最深也不过10千米，即穿不过花岗岩层。在这样薄薄的一层表皮中，它所含的热量也可以估算出来。如果10千米厚的薄壳质量为8.3×10^{23}克，平均温度取150℃，岩石的比热取花岗岩的比热（0.816焦耳/克℃），则热含量为10.05×10^{25}焦耳，是全球热含量的十万分之一。然而，即使要取出这样深度内

的全部热含量也是不可能的。一方面是它们太分散，另一方面也要考虑成本。因为钻探愈深，成本成倍地增加。根据现在的经验，地热钻井的深度不宜超过3千米，否则就无利可图了。如果一个地区的地温梯度只是正常值，为30℃/千米，那么，3 000米深的钻井只能取得近100℃的热水，那样将是极不经济的。幸好地球内部的温度并不是均匀地分布的，就像前面所说的一样，有的地方热流值非常高，有的地方热流值非常低，有的地方接近于全球平均热流值。能够开采地热能的地区只是热流值高的地区。这是由于地球内部经历了某些地质过程，如年轻的构造运动，或年轻的岩浆活动，或年轻的变质作用，使得地球中所含的热量能在某一个地区集中起来，形成所谓地热异常区，从而达到人们能利用的程度，构成一种特殊的能量资源，这样的能开采的地热就叫做地热资源或叫地热能。

由于这些年轻的地质过程主要发生在各构造板块相汇聚的地方，所以地热活动强烈的地区也就出现在板块汇聚处。因此，地热异常区常常是呈带状分布的。在地热异常区中，热流值常常达到很高。西藏南部的大地热流值可达到167.47毫瓦/米^{2}以上。此外，地表也常常出现许多强烈而多样的水热活动，我们可以称它们为地热显示。火山是地热活动中最为猛烈的地热显示，而温泉则是最常见的、最温和的地热显示。在西藏南部，虽然没有年轻的火山活动，但是温泉活动则非常发育。

在一个有限的范围内，如果有温泉出露，我们可以把它称为水热区。在一个水热区的范围内，可以是单独的一个温泉，也可以是由许多温泉组成的温泉群。但是各泉之间有着密切的关系，有着共同的补给源，它们排出的地点相距也不会远。因为它们是以水热活动的方式出现的，传递热量的方法主要是靠水的对流，所以可以把它们称为水热对流系统。

也有一些地区地热活动并不以水热活动的方式出现，也就是说，不是通过水的对流把热传递出来。它们是以岩浆形式喷出地表，形成火山，可以把它们称为岩浆系统。有时没有喷出地表，而是在地壳浅处几千米处停留下来，它们周围是致密的岩石，裂隙很少，没有水往

下渗，岩浆的热就只好通过上覆的岩石传输到地表，在地表形成高传导热流区，人们就把它们称为干热岩系统，2006年有人把这种干热岩系统改称为增强型地热系统，认为它储存有大量的地热能。

无论是水热系统还是干热岩系统如果没有经过详细的勘探工作，并不能确定它们是否值得开发。如果经过详细的勘探工作，证实地下富集有可以供给经济利用的地热能的话，这时才可以把这样的地域称为地热田。

岩浆系统的开发就是设法直接从活火山的火山口的熔岩湖中采取热能。目前，美国在夏威夷岛的基拉维厄火山的一个熔岩湖中进行了热交换的实验。在意大利，有人认为西西里岛的埃特纳火山顶峰之下，有一个100米宽、2千米深的圆筒状热储，在平静时期，岩浆以0.35立方米/秒的速率补入热储，当热储满了之后，它们就从火山顶部和翼部沿着一些断裂处发生外流，发生喷发。大约每6年喷发一次，这样的现象可能已持续了450年，这里可能有一定的地热价值。目前，如何从岩浆系统中提取热能还处在实验阶段。这种系统目前在我国还没有发现。

干热岩系统是地下深处有热的岩石，使得地下2~4km深处的温度保持在140℃~250℃之间，岩石的地热梯度达50℃/km，大地热流值为209~251毫瓦/米^2。但是，周围的岩石和侵入体本身的裂隙很不发育，因此透水性很不好，地下没有水，所以叫干热岩。要从这些干热岩中取出热能，就必须人为地创造一种循环系统。方法是打一个深3km的钻孔，在钻孔底部进行人工爆破，产生一个人工热储，然后再钻入生产井，由一口井注入冷水，冷水在热储中与干热岩进行热交换，取得热能，然后由另一口井泵出，进行净化处理后加以利用。目前，美国、日本、英国、法国和澳大利亚都进行了这方面的试验工作。美国新墨西哥的阿拉莫斯实验室在瓦勒斯破火山口进行了这项试验。图10—2是利用干热岩的热能进行发电的一种设想。

在俄罗斯东北部的一个金矿，企图利用干热岩进行矿山的开采，如果能建立一个50℃的循环系统，就能明显融化冻结的矿砂，使金矿能全年进行开采；如果循环达100℃，就可以解决矿区、洗矿厂和住宅

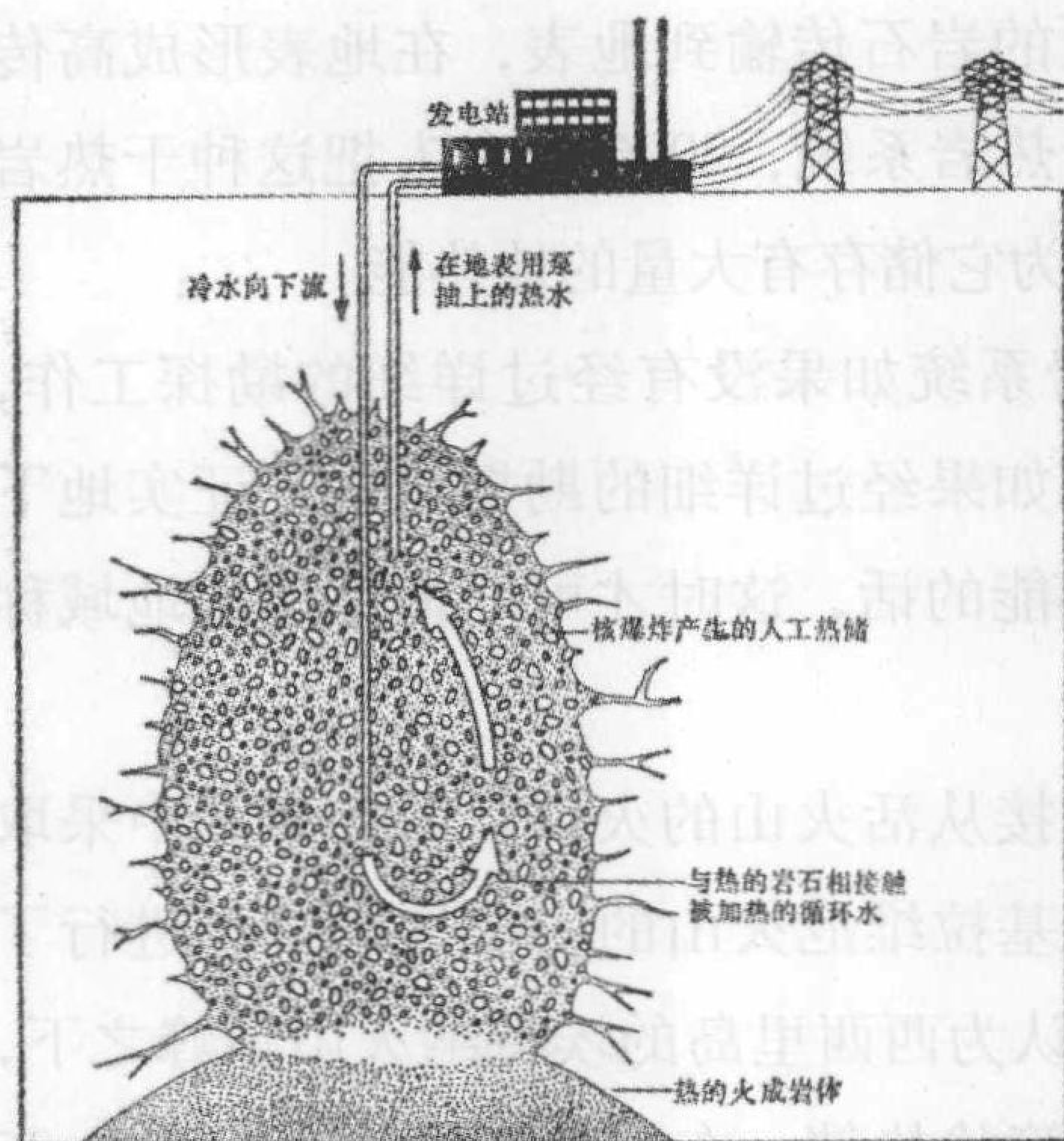


图 10—2　表示如何从干热岩体产生电力的方法

区的供热问题。

水热系统又叫水热对流系统，大部分热量并不是通过传导方式传递的，它是通过流体的循环对流传递的。水热系统中的对流，就像坐在火炉上的水壶中水的对流一样，是由于在重力场中流体的受热和随之而来的热扩散引起的。流体在循环系统的底部受热，热是驱动这个系统的能，低密度的受热流体上升，它们被较高密度的冷流体所代替，冷的流体由系统的边缘供给，对流使系统上部的温度升高，使系统的下部温度降低。

根据水在对流系统中存在的状态，可以把水热对流系统分为 5 种类型。图 10—3 是水的沸腾曲线图。在地下，水的沸腾温度随着深度的加深而增加，曲线的位置就是地下某个深度发生沸腾的地方。在曲线的下方，水以液态方式存在，在曲线上方，水以气—液两相状态存在。

有的水热系统无论在地表，还是在深部，水都是以液态存在，也就是说不可能发生沸腾，这种水热系统就称为温水系统。世界上绝大部分温泉都可能是属于这种温水系统（图 10—4 和图 10—5）。它是在缺少年轻火成侵入体地区所发育的环流系统，它可以由大气降水在传导区域热流机制下的深循环过程产生。形成这种系统的先决条件是存在足以使水发生循环的高渗透率的断层或破碎带。热水的温度主要取决于区域热流

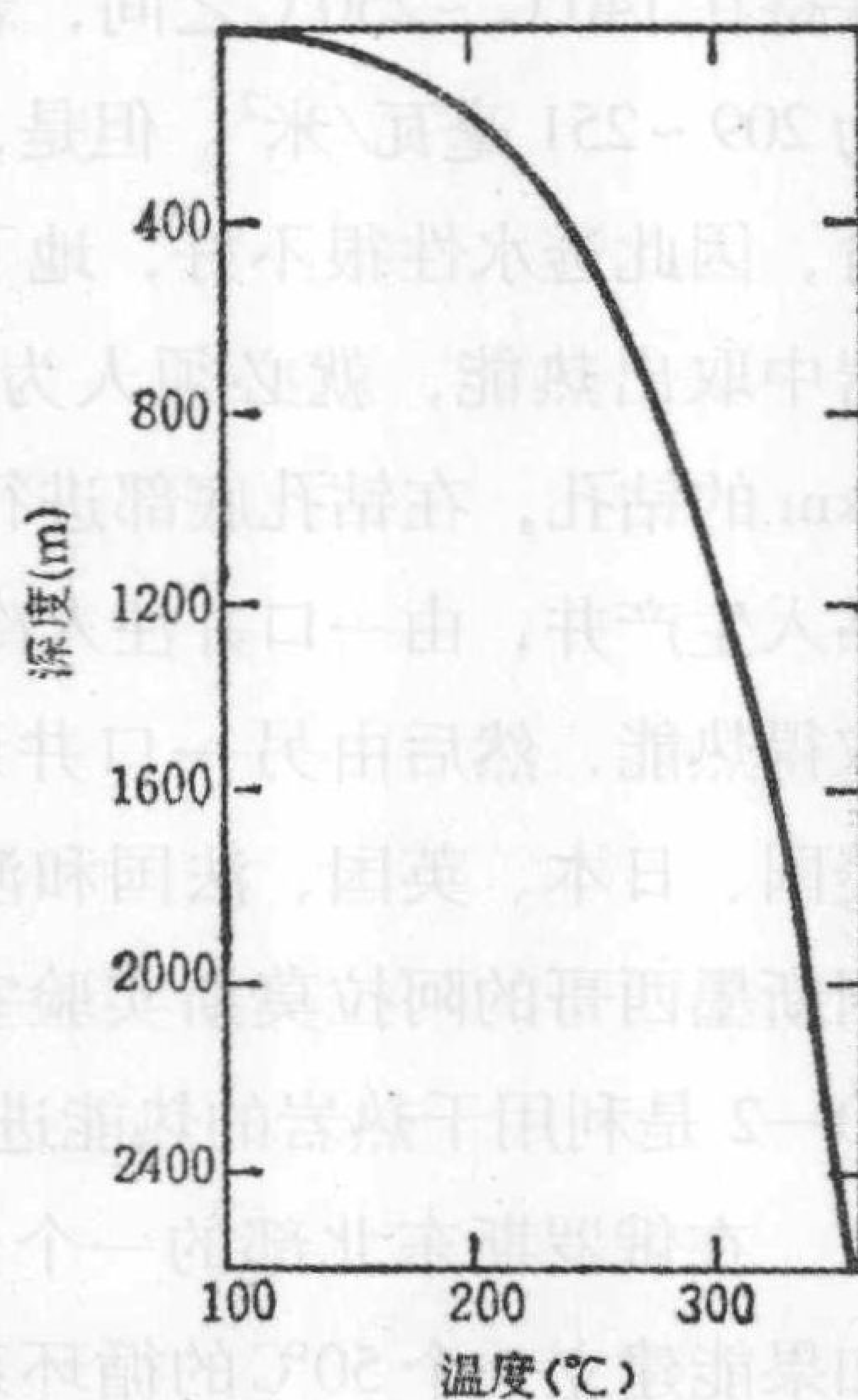


图 10—3　水的沸腾曲线

量的大小和深循环的深度。在这里我也将沉积盆地所含的低焓热水（<150℃）归为温水系统（图10—6）。尽管它的热状态仅仅来自热传导，而且通常是稳态过程，所含流体因温度差小而没有对流循环。沉积盆地和一般的温泉一样它们所含的地下热水构成低温地热资源。如华北平原和松辽平原等，它们的含水层中含有许多温水，实际上它也是一种温水系统。没有岩浆热源，完全靠地热增温率增温。1982年美国在低温地热资源的评价中将低温地热资源的热储模式进行了概括：

水热对流系统：

（1）单个的温泉和热水井（图10—4），可以分为断层泉、断陷盆地的深部热储和背斜构造三类。

（2）圈闭的地热储（图10—5），从地质构造上也可分为三类。

传导为主的系统：（图10—6），它们也可分为两种类型，即一般沉积盆地和滨岸平原。

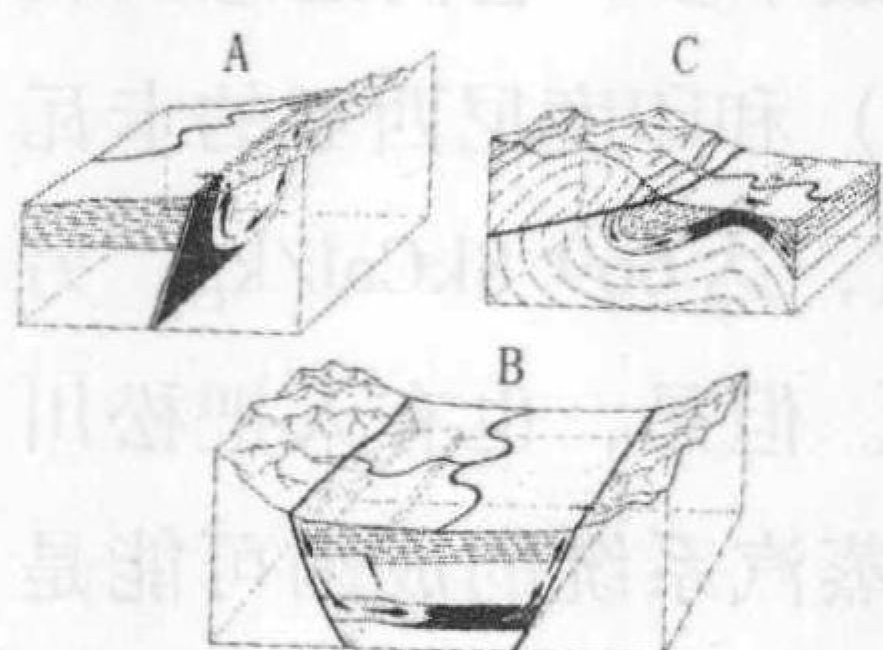


图10—4　含有低温地热资源的水热对流系统的概念模式：类型1，单个温泉热水井。A：断层泉；B：深部热储；C：背斜构造。箭头指示流体循环方向；阴影区表示含有低温地热资源的地热储的位置（据Reed，1983）。

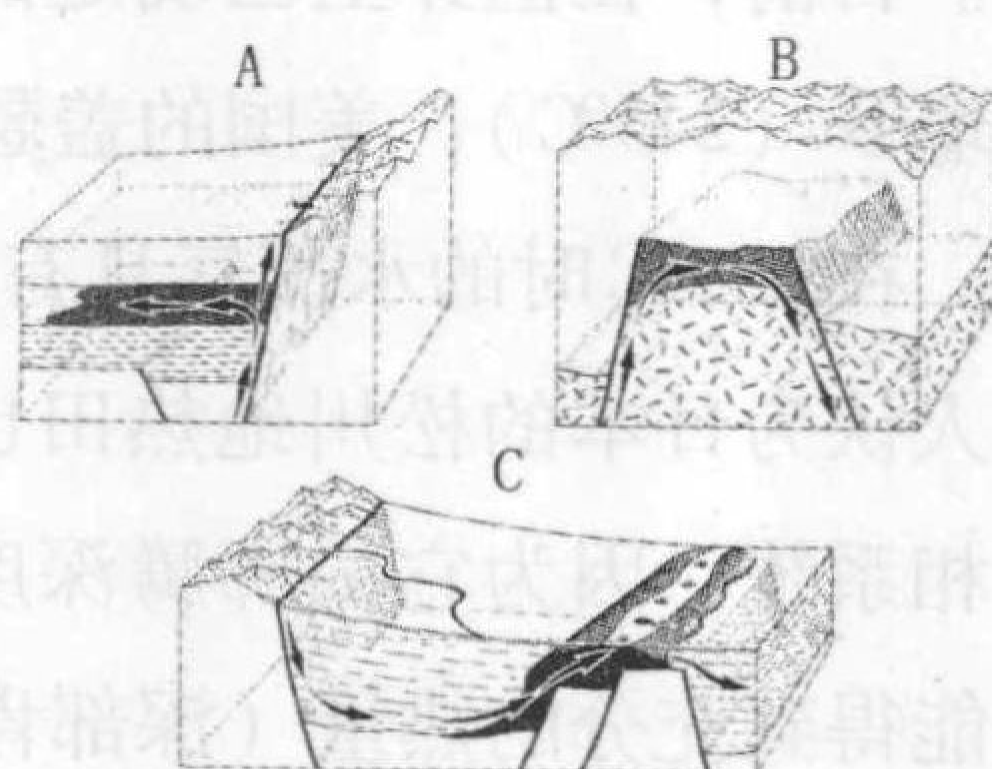


图10—5　类型2：圈闭的地热储。A：侧向补给；B：地垒构造；C：盆地结构。箭头指示流体循环方向，阴影区表示含有低温地热资源的地热储的位置（据Reed，1983）。

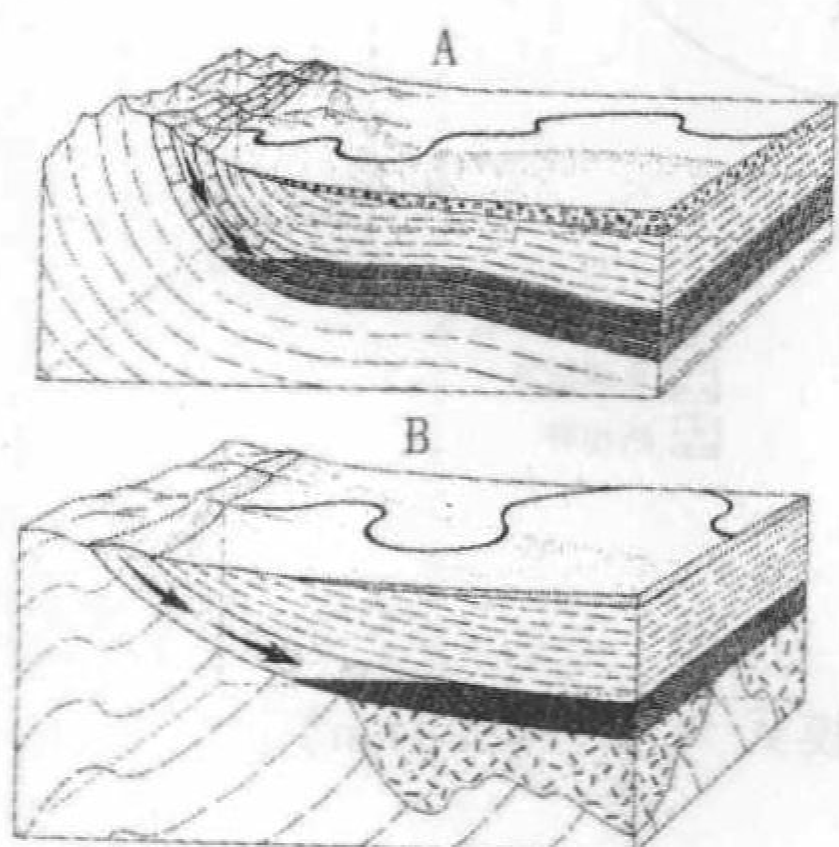


图10—6　传导型低温水热系统，A：沉积盆地；B：滨岸平原。箭头指示流体循环方向，阴影区表示含有低温地热资源的地热储的位置（据Reed，1983）。

如果水在地下深处以热水形式存在，只是当它上升到地表附近时，才发生沸腾，这时在地表也有沸泉出露。但是，他们的沸腾深度很浅，常常只有十几米，有时也可深达数百米，但是仅发生在井管之中或热储层的顶部，整个热储层含有的还是液态的水，这种水热系统就称为热水系统（图 10—7 和图 10—8），两者的差别在于后者出现于活火山附近。我国西藏羊八井地热田就是一个热水系统，其地下的沸腾深度，在热田南部仅有十多米，往北才逐渐加深。如果地下沸腾带比较深，那么，储热层中不仅含有热水，也含有大量的水蒸气，这种水热系统就称为两相系统。在世界上许多已开发的高温地热田都属于两相系统。它们沸腾带的深度可达上千米深。沸腾带愈深，含水蒸气的量愈大。因此压力也比较大。沸腾带的深度不同，热田的特性也不同。

如果在储热层中所含的全部是干蒸汽，则可以称为蒸汽系统（图 10—9）。目前，在世界上已确定的蒸汽系统为数不多，它们是意大利的拉德瑞罗（245℃），美国的盖瑟尔斯（245℃）和印度尼西亚的卡瓦卡玛江。在 235℃时的水蒸气具有最高的热焓值，达 669. 8kCal/kg。另外，有人认为日本的松川地热田也属于这一类。但是，也有人把松川归为两相系统，因为它的沸腾深度较深。有关蒸汽系统的成因可能是热储层能得到充分的热量（深部肯定存在岩浆热源），而供应的冷水不

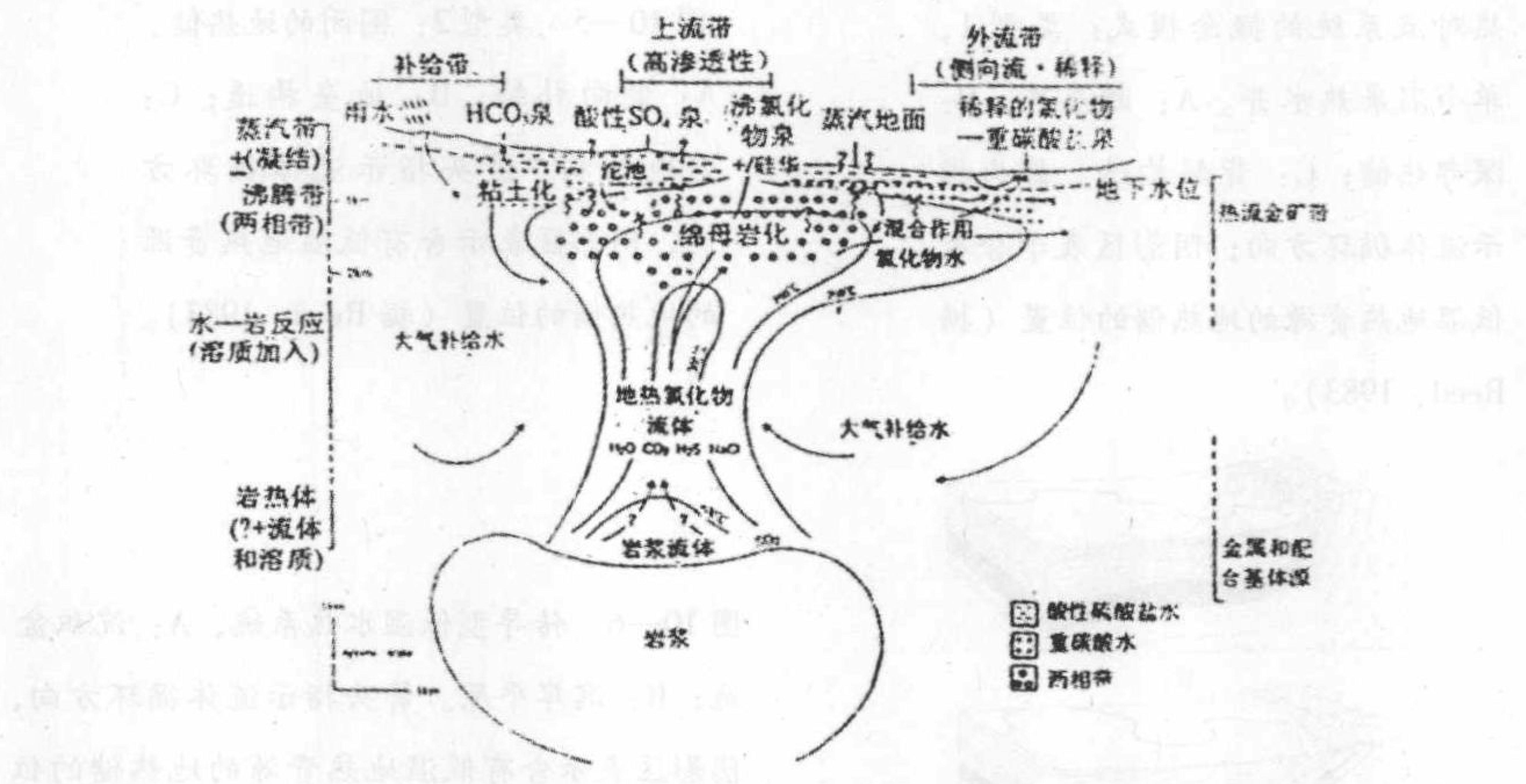


图 10—7　具有低地形的热水系统的概念模式（据 Nicholson）

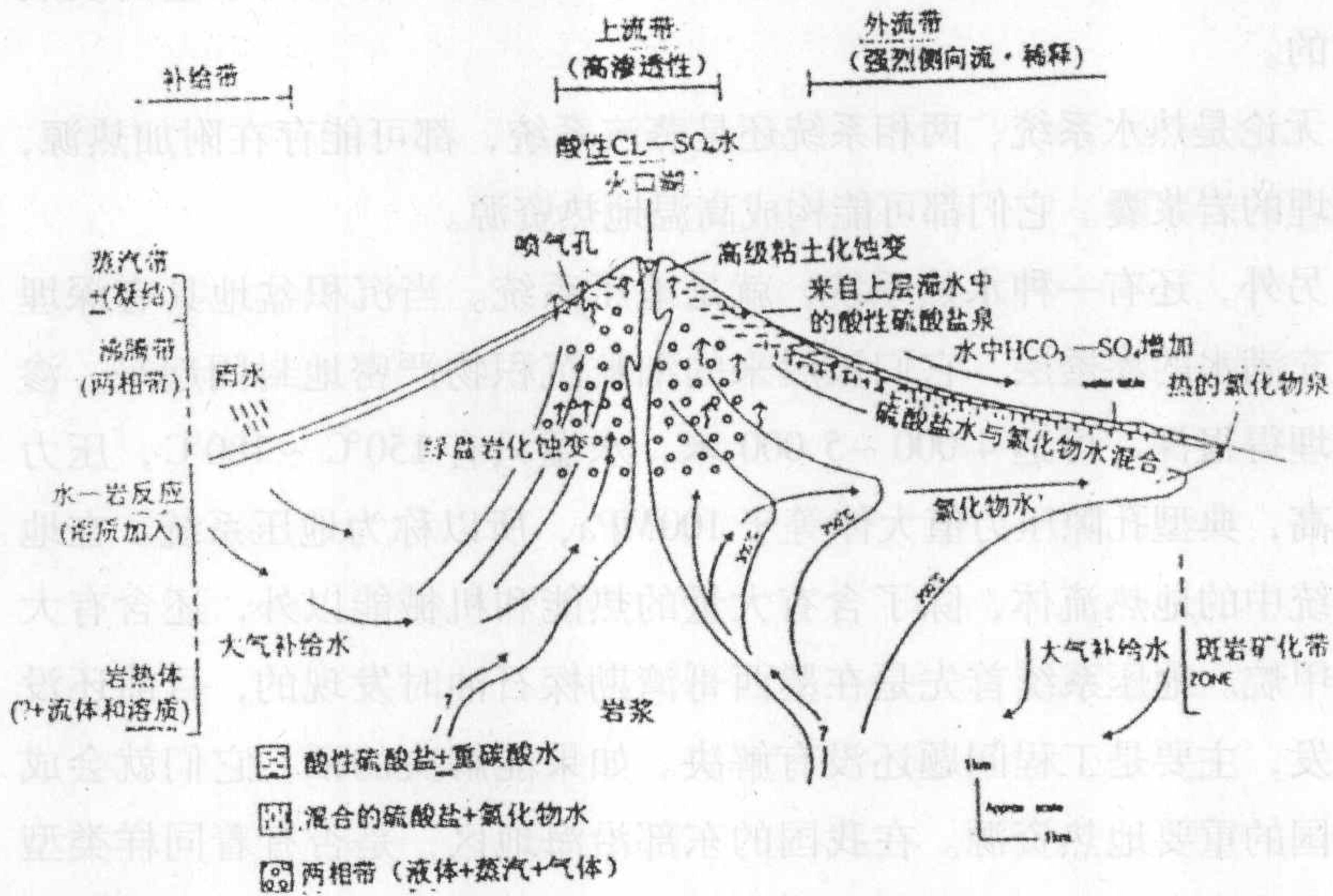


图 10—8　具有高地形的热水系统的概念模式（据 Nicholson）

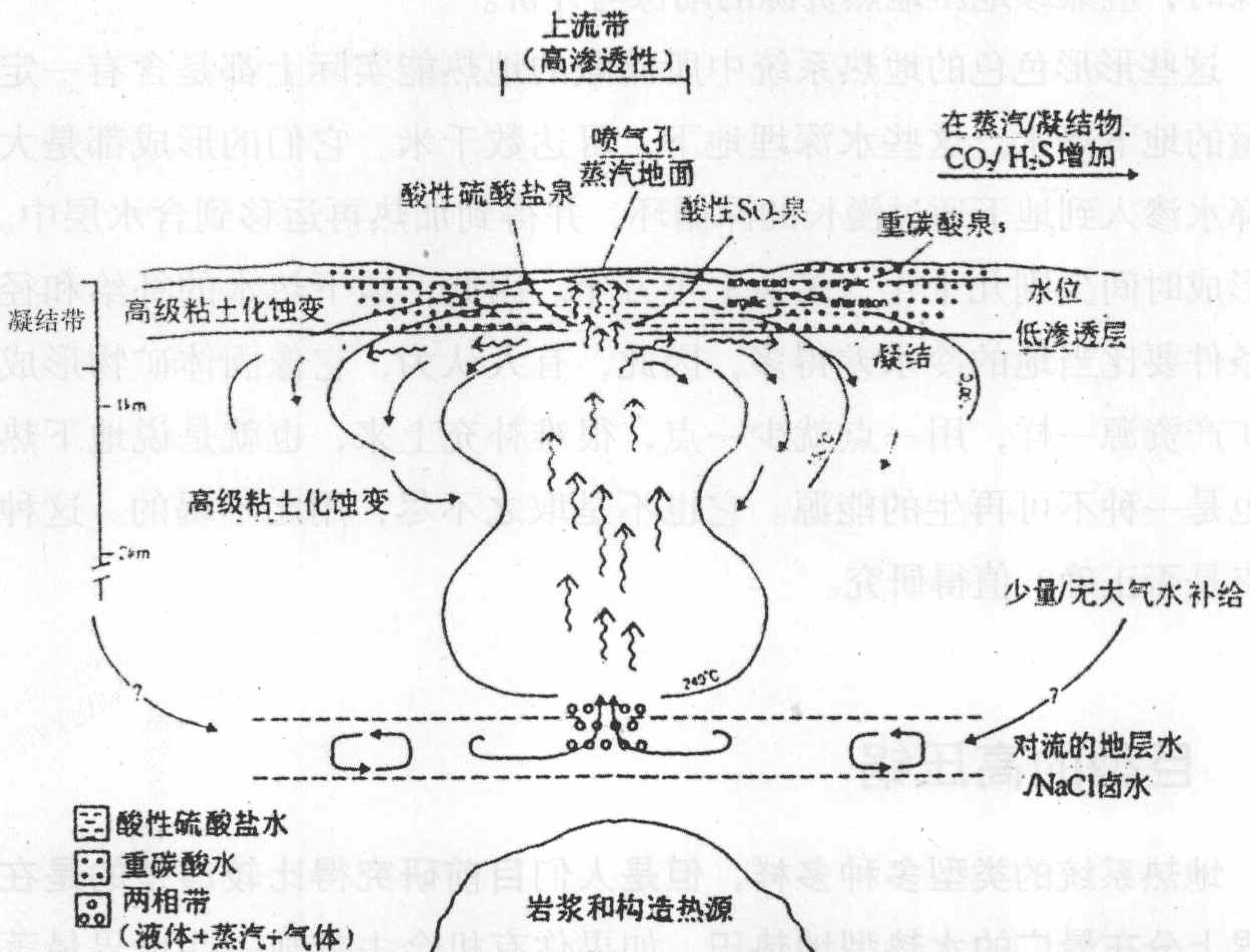


图 10—9　蒸汽为主的地热系统的概念模式（据 Nicholson）

足；也可能是当热量很大时，沸腾的水量远远多于补给的水量而发展起来的。

无论是热水系统、两相系统还是蒸汽系统，都可能存在附加热源，如深埋的岩浆囊。它们都可能构成高温地热资源。

另外，还有一种水热系统，就是地压系统。当沉积盆地具有深埋的、充满水的渗透层，它们被后来的细粒沉积物严密地封闭起来，渗透层埋得很深，可达4 000 ~5 000 米，水温只有150℃ ~180℃，压力却极高，典型孔隙压力值大体等于100MPa，所以称为地压系统。在地压系统中的地热流体，除了含有大量的热能和机械能以外，还含有大量的甲烷。地压系统首先是在墨西哥湾勘探石油时发现的，目前还没有开发，主要是工程问题还没有解决。如果能解决的话，它们就会成为美国的重要地热资源。在我国的东部沿海地区，是否有着同样类型的地压地热资源呢，这还是一个很值得研究的问题。在海南岛西南的莺歌海盆地，在勘探石油时就有所发现。山东黄河口的胜利油田是否也有地压系统值得注意。总之，在我国东部沿海地区在进行油气资源勘探时，应兼顾地压地热资源的勘探与评价。

这些形形色色的地热系统中所储藏的地热能实际上都是含有一定热量的地下热水。这些水深埋地下，可达数千米。它们的形成都是大气降水渗入到地下通过漫长的深循环，并得到加热再运移到含水层中。其形成时间少则几十年，多达上千万年。因此，地下热水的补给和径流条件要比当地的冷水差得多，因此，有人认为，它像固体矿物形成的矿产资源一样，用一点就少一点，很难补充上来，也就是说地下热水也是一种不可再生的能源。它也不是取之不尽，用之不竭的。这种观点是否正确？值得研究。

三　巨型的高压锅

地热系统的类型多种多样，但是人们目前研究得比较清楚的是在世界上分布最广的水热型地热田。如果你有机会去参观一些世界最著名的地热发电站，那么你就会发现，不同的水热型地热田，在温度、

压力和流体化学性质等方面各有不同，甚至差别很大。开发得最早的意大利拉德瑞罗和目前发电量最大的美国盖瑟尔斯，都是干蒸汽田，温度为245℃。温度最高的是墨西哥赛罗普列托，达375℃。温度比较低的是日本的大岳，约为200℃。我国目前正在开发的羊八井浅层热储，约160℃。温度不同，各热田的压力也不同。但是，这些热田，在结构和构造上都有着近似的特征。这些特征是：①有一个能大量输出热的天然热源；②有一个完好的盖岩层；③有一个含水层或渗透层，可储存地热流体（图10—10）。储热层和盖岩层就像一个封闭完好的高压锅，坐在天然热源上加热一样。

一般认为，在高温水热对流系统的下面，在地下不大深的地方，有着还没有冷凝的侵入体。侵入的深度通常在7~15千米之间，它们的侵入时间不太老，可能是上新世以后侵入的，因为至今还没有完全冷却。估计它们的温度还保持在600℃~900℃之间，因此它们所含的热会源源不断地通过覆盖在它上面的不渗透的岩层而向上传输到储热层之内。但是这种热源的存在，只不过是一种推测，因为谁也不可能看见。世界上最奇特的地热区之一是美国西部的黄石公园，在那里仅间歇泉就达200多个。可是，直到最近人们才知道黄石公园的地热活动是由高原下面一个很大且埋得较浅的酸性岩浆体引起的。黄石公园在新生代以来曾有过多期火山活动，最早喷出的一次是玄武岩。然后，在190万年前，喷出了2 500立方千米的火山灰，形成了一个直径30千米的破火口。到120万年前，又喷出250立方千米的火山灰。紧接着是在60万年前，从黄石破火口

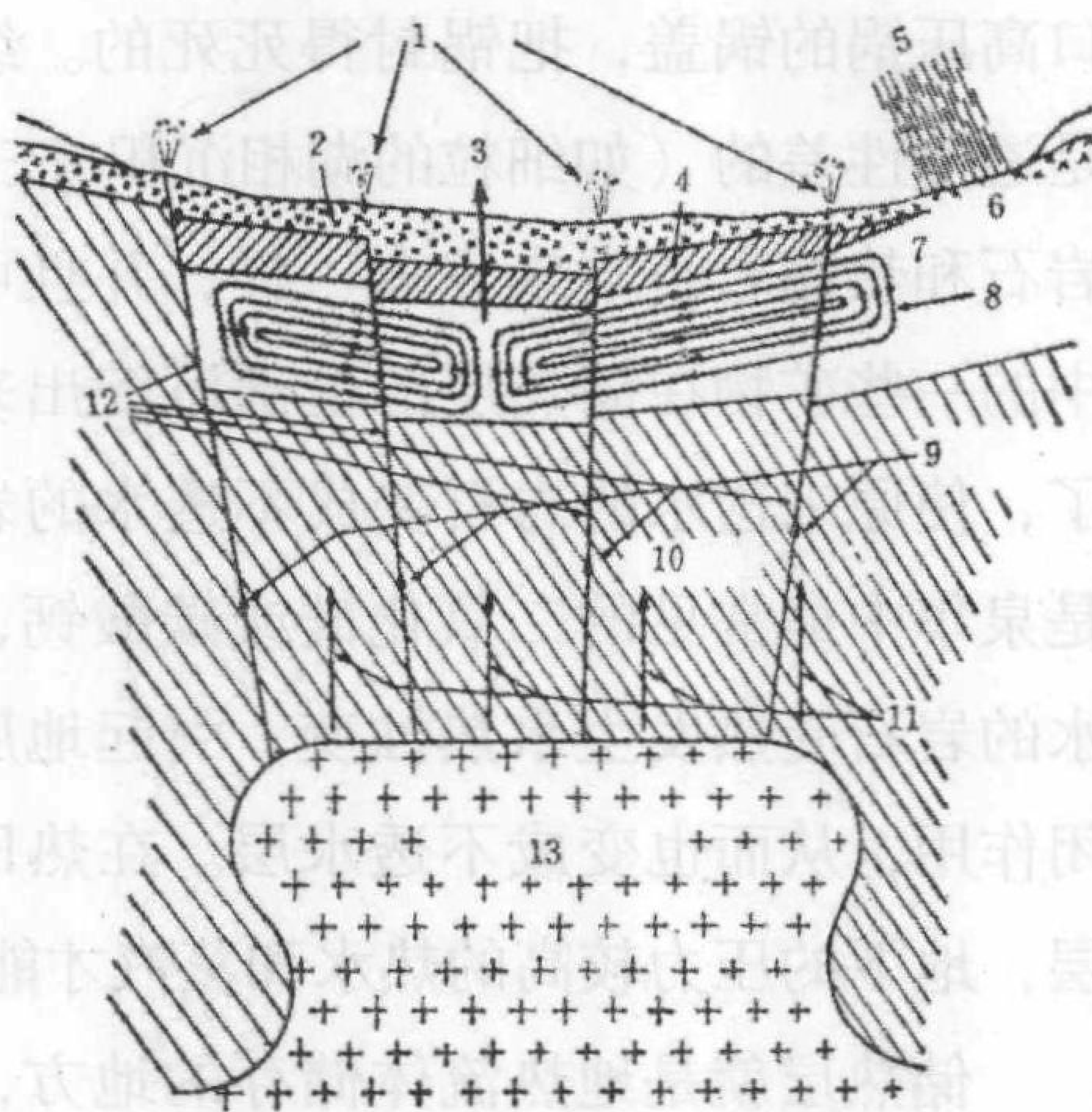


图10—10　一个地热田的理想结构（据H.C.H.阿姆斯特德，1978）1. 地表显示；2. 地表松散层；3. 钻孔;4. 盖岩层；5. 雨水；6. 基岩；7. 含水层；8. 对流环；9. 岩浆气体和蒸汽；10. 岩层；11. 传导热流；12. 断层；13. 岩浆室。

处又喷出900立方千米的火山灰。活动期的破火口规模为70×45千米，到35万年前，在破火口东侧又出现小规模的流纹岩喷发。但是，地下的情况又怎样呢？据黄石公园进行的重力测量，发现公园的范围与50毫伽重力负异常等值线所圈闭的范围一致，这说明重力异常是由高温岩浆体引起的。当地震波穿过高原时，p波的波速明显衰减，可以认为岩浆体还是呈塑性状态。有人估算，这个岩浆体的体积约为45 000立方千米，所含热量为112 498.8×10^{18}焦耳，它们是黄石公园热泉和间歇泉活动的理想热源。

盖岩层是位于水热对流系统顶部的透水性差的岩层，它好像是一口高压锅的锅盖，把锅封得死死的。组成盖岩层的岩石，有些本来就是透水性差的（如细粒的湖相沉积或三角洲相沉积物）。有些盖岩层的岩石和热储岩石本来完全一样，并且可能发育着许多裂隙，但是热水中的一些矿物在储热层的上部沉淀出来，把原来的裂隙或孔隙都堵死了，使原来透水的岩石变成不透水的岩层。这些新沉淀的矿物通常就是泉华中最常见的二氧化硅或碳酸钙，即硅华和钙华；有些是地表透水的岩石受热发生水热蚀变，引起地层强烈的高岭石化，导致了自封闭作用，从而也变成不透水层。在热田开发过程中，只有钻通了盖岩层，地下的压力较高的热水和蒸汽才能冲到地面上来。

储热层就是地热流体储存的地方，就像储油层储存石油的场所一样。但是储油层基本是由沉积岩组成的，而储热层则不一样，它可以是火成岩，也可以是变质岩，或者是硬结很完好的沉积岩。美国在研究了本国的水热区的储热层之后发现，31.1%的储热层是由火成岩组成的，22.2%是由沉积岩组成的，20%是由火山灰层组成的，20%为水热蚀变的岩石组成的，6.7%为变质岩组成的。因此，地下热水或蒸汽不像石油一样主要存在于沉积岩的碎屑颗粒之间的空穴中，或是储存于碳酸岩之溶洞中，而是存在于断裂、裂隙或溶解的通道或空洞之中。储热层中所储存的地热流体，如果是热水就叫热水储，如果是蒸汽就叫蒸汽储，如果是汽水两相混合物就是两相储。

各个水热型地热田的规模很不一样。有的大达150平方千米（如新西兰的那法热田），有的小为1平方千米（如我国怀来后郝窑热田），

一般常见的为10多平方千米左右（如羊八井热田浅层热储约14平方千米，腾冲热海热田为8平方千米）。储热层的埋深差别也较大，有的盖层厚达100多米（如新西兰的怀拉基热田），有的仅厚数十米（如羊八井热田浅层热储的盖岩层仅厚30多米）。同样，热储厚度在不同热田也有差别，如羊八井热田浅层热储厚仅200多米，有的厚度则超过1千米。目前要测定热田的面积和深部的结构并不困难，在世界上最常用的方法是电测深方法，其基本原理是根据水热型地热田所含的热水会使视电阻率大大地下降。

水热对流系统根据储热层的温度可以分为高、中、低温三种，高温水热系统的热储温度大于150℃，低温水热系统的热储温度小于90℃，热储温度介于90℃～150℃之间的称中温水热系统。

一个水热系统只要知道了它的热储温度、热储面积、热储厚度，以及热储的体积比热，就可以近似地求出热储的热含量。由于许多水热系统并未进行钻探工作，因此热储的温度只能根据地球化学温度计算出的温度来推断。

如果一个热田的盖岩层厚度为1 000米，热储的可采深度为3 000米，那么热储的厚度（d）为2 000米，热储面积（a）为10平方千米，热储温度（T）为200℃，当地年平均温度（t_1）为15℃，岩石的体积比热为2.6焦耳/厘米^3·℃，则热储的热含量（q）可用下式求得：$q=cad(T-t_1)$。将上面假定的参数带入，求得$q=9.6\times10^{12}$兆焦。这些热量存在哪儿呢？只有一小部分存在于水中，绝大部分是存在于热储的岩石之中。因此，热储中所储藏的热量并不可能全部被取出来为人们所利用。根据地热专家们的计算，一个热田的资源量只是它的热含量的1/4，甚至只为1/5。即采收率为0.25或0.20。因此，上述热田的资源量约为2.4×10^{12}兆焦或1.8×10^{12}兆焦。

如果勘测的地热田属于高温水热对流系统，可以根据资源量计算其井口有用功，进一步估算地热发电的装机容量；对于中、低温水热对流系统则可根据资源量计算进行非电利用的有用热量。这些计算工作就是地热资源评价工作。我们就不在此详细讨论了。图10—11是中国初步确定的高温水热对流系统的分布图。

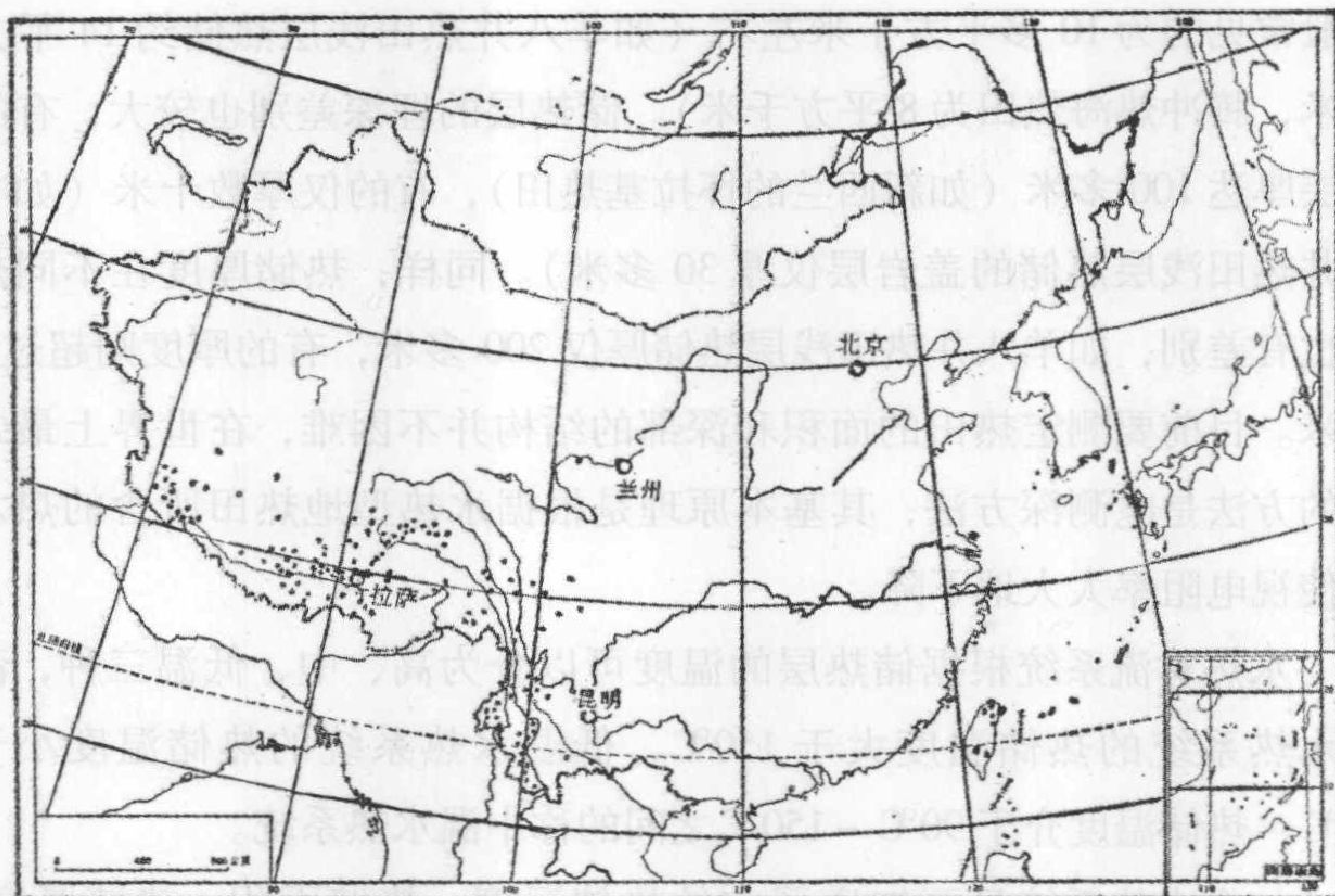


图 10—11 中国初步确定的高温水热对流系统分布图

西藏、四川西部和云南西部出露的温泉呈带状密集分布，都处于欧亚板块和印度板块的碰撞造山带上，具有相同的构造成因，而且温泉区主要分布在西藏和滇西，因此将这个地区统称为滇藏地热带，该地热带是近纬向的地中海—喜马拉雅地热带的一部分。滇藏地热带是我国地热活动最强烈的地带，出露的温泉总数超过全国的一半（约1 700个），汇集着我国大陆地区所有的沸泉、沸喷泉、喷气孔、冒汽地面、水热爆炸区和间歇喷泉等71 个高温地热显示区。在滇藏地热带内我们实地考察了1 028 个温泉，并对它们采样和化学分析，利用地球化学温度计并考虑它们形成的地质背景，将它们分为高温地热系统（热储温度 >150℃，但深度 <3 000 米）（61 个）、准高温地热系统（热储温度 >150℃，但深度 >3 000 米）（194 个）、中温地热系统（112 个）和低温地热系统（661 个）。其中高温地热系统的热储热能为 120EJ，发电潜力约为 2 781MW_{30a}。准高温地热系统的热储热能为 233EJ，发电潜力为 3 036MW_{30a}。中温地热系统的热储热能为 38. 76EJ，低温地热系统的热储热能为 79. 34EJ。

四　巨大的热水盆地

沉积盆地虽然储存的是温水，但是由于面积巨大，所含的地下热水所储存的地热能也就巨大，因此是一项不可忽视的能量资源。我国大陆地区中、新生代沉积盆地分布很广，总面积达350万平方千米（面积<200平方千米者不计），占我国陆地面积的35%。盆地面积>10万平方千米的大型盆地有9个，1~10万平方千米的有39个（图10—12）。就其形成的地质背景可以分成三种类型：裂谷型盆地：如渤海湾盆地（含华北盆地）、松辽盆地、江汉盆地、苏北—南黄海盆地、汾渭地堑和雷琼盆地；山间地块盆地：如塔里木盆地、准噶尔盆地、和柴达木盆地等；地台型盆地：如鄂尔多斯盆地和四川盆地。

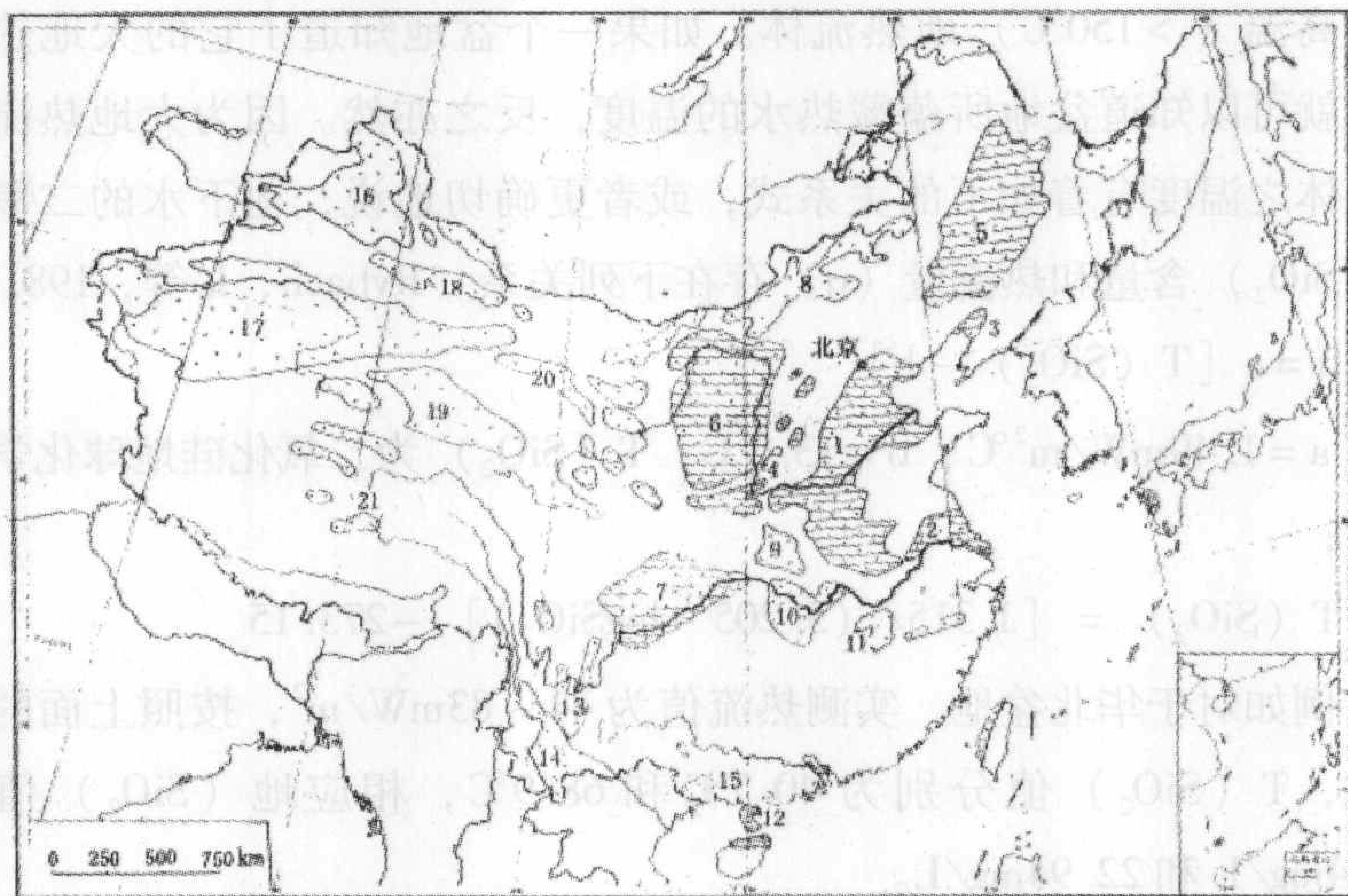


图10—12　中国中、新生代沉积盆地分布图（据陈墨香等，1994）

根据陈墨香等先生的研究，我国中、新生代沉积盆地热水形成的机制，基本上可以用"层控热储—侧向径流补给—大地热流供热"的模式加以概括。

在表8—3所列的2 239口地热井中，大部分都是为开采大型盆地的地下热水而钻井的。如为开采华北盆地的地下热水，在北京有300口井，天津251口，河北200口，山东100口，河南300口。在汾渭地

堑内的地热井，山西有230口，陕西186口。因此华北盆地的地热井占地热井总数的51.4%；汾渭地堑占18.6%。这两个盆地地热井数就占了总井数的70%。它们成为我国开采中低温地热水的主要场所。因为像渤海湾（包括华北盆地）这样的大型沉积盆地有利于热水资源的形成与赋存。大型盆地的沉积层巨厚，其中古近纪和新近纪的厚度就达上万米。它们既有高孔隙率(15%～30%)和高渗透率(156～2 500)×$10^{-9}m^2$砂岩和砾岩层作为热水储集层；也有由细粒沉积物组成的隔水层。大型沉积盆地的水动力环境具有明显的分带性。它的外环带为径流积极交换带，内带为径流缓滞带，进入盆地的地下水流，穿越外环强径流带之后进入径流缓滞带，地下水流变为长距离的水平运动，从而使地下水能够充分地吸取岩层的热量。但是由于大地热流值是沉积盆地储热层的热源，它没有附加的热源，这就决定了沉积盆地不可能产生高温（>150℃）地热流体。如果一个盆地知道了它的大地热流值，就可以知道盆地所蕴藏热水的温度，反之亦然。因为大地热流值与流体之温度有着如下的关系式，或者更确切地说，地下水的二氧化硅（SiO_2）含量和热流量（q）存在下列关系（Rybach，L等，1981）：

$$q = a\ [T\ (SiO_2)\ - b]$$

式中 $a = 1.49mW/m^2℃$，$b = 13.2℃$，$T\ (SiO_2)$ 为二氧化硅地球化学温度计；

$$T\ (SiO_2) = [1\ 315/\ (5.205 - \log SiO_2)] - 273.15$$

例如对于华北盆地，实测热流值为41～83mW/m^2，按照上面的关系式，$T\ (SiO_2)$ 值分别为40.7℃和68.9℃，相应地（SiO_2）值为10.34mg/L和22.94mg/L。

同时还应该提及的是，沉积盆地含水层所含的地下热水的含盐度是可否直接利用的关键因素。我国东部大型中、新生代沉积盆地的沉积建造具有明显的三分特点（陈昌明等，1982），即底层属于断陷初期阶段，盆地中充填碎屑岩和火山岩；中层为盆地大幅度沉降期，在封闭和半封闭湖盆条件下沉积了咸水、半咸水湖相建造；上层为盆地演化晚期的沉积在接近夷平状态下形成的广盆式河流-浅湖相的厚度巨大的淡水沉积建造。因此上层的地下热水是最适宜利用的。在华北盆地、

苏北盆地和江汉盆地的新近系就是这样的重要淡热水含水层，而且厚度巨大，可达2 000米，上覆数百米的第四系，是很好的盖岩层。这三个盆地的古近系是富含有机质和高盐度的暗色泥岩，不是良好的热水储层，但为重要的生油岩系。在松辽盆地，新生界很薄，白垩系上统厚数百米，为主要的热水储层；白垩系下统则是含盐度高和富有机质的生油层。至于地下热水的含盐度和深部分布的状况，可以由盆地内的电阻率测量来提供一定的信息。

在一些沉积盆地的基底，在沉积盖层之下还存在深部基岩热水储层。这些基岩热水储层主要是下古生界和元古界的碳酸盐岩建造，如果它们在沉降之前曾经暴露于地面而经过强烈的喀斯特化，它们会成为有着重要的经济价值的地热田。在北京地热田、牛驼镇地热田最为清楚。就北京地区而言，基岩热储的开发最早是从东南角大兴隆起的开发开始的，1971年2月28日在氧气厂钻成第一眼热水井，孔深650.3米，温度39.2℃。使北京城区的地热勘探实现零的突破。当年还完成了天坛公园和北京火车站的两口地热井的钻探，后者的抽水温度达53℃。但是北京凹陷西北翼地热开发的突破却是在2000年。到2001年10月2日，在北京大学静园钻成京热—119地热井，该井位于八宝山断裂西北盘。井深3 168米，出水温度59℃，流量2 232m^3/d。北京大学一带新生界很薄仅100～200米。下伏奥陶系，从奥陶系到寒武系都是碳酸盐岩，裂隙和溶洞发育，水力联系良好，温度保持在20℃左右。当钻机穿越下伏隔水和绝热的上元古界青白口系，进入蓟县系铁岭组的碳酸盐岩层时，水温上升至40余℃，当钻机再穿透洪水庄组的页岩层，进入雾迷山组的碳酸盐岩层，温度又上升到接近60℃。按照正常情况分析，假定当地的地温梯度为25℃/km，3 000米深的钻孔应该获得近90℃的温度，然而现在只有60℃。另外，从本质上来说，这样的钻孔开采的实际上就是深层的地下水。该钻孔主要用于洗浴和采暖，所带来的经济效益和环境效应值得进一步评估。

1994年陈墨香等对我国东部和中部10个大中型盆地的热水资源进行了量级的估算（表10—1），对于西北部的盆地，一因研究程度太差，一因它们地处气候干旱区，淡水资源宝贵，而该区的地下热水主要为

咸盐水，一般无实际意义，因此未作估算。

表 10—1　我国主要沉积盆地地热资源汇总表（据陈墨香，1994）

盆地名称	热水层位	温度	矿化度	盆地面积	计算深度	积存水量	积存热能	$10^3 km^2$的热能	可采水量	热能量
		（℃）	（g/L）	$10^4 km^2$	（m）	$10^8 m^3$	（EJ）	（EJ）	$10^8 m^3$	亿吨标准煤
华北北部	N	30 ~ 70	1 ~ 3	9.0	350 ~ 2 000	194 300	2 880	32	1 240	5.4
华北北部	Pz_1，Pt_{2+3}	50 ~ 90	0.5 ~ 1.5	1.8	<3 000	1 700	37	2.1	424	3.6
华北南部	N	30 ~ 40	1 ~ 3	6.8	350 ~ 1 300	98 660	840	12.3	1 000	2.87
苏北	N	34 ~ 57	<1	3.2	350 ~ 1 600	39 800	500	15.6	428	1.60
下辽河	E	34	<1	0.34	800 ~ 1 100	2 340	19	5.5	50	0.13
松辽	K_2	30 ~ 50	1 ~ 5	1.44	300 ~ 2 000	32 000	370	2.6	320	1.26
汾渭	N，E	33 ~ 40	<1	2.0	<1 000	60 500	448	22.8	300	0.77
鄂尔多斯	K_1，J，T，P	27 ~ 39	1 ~ 5	16.0	400 ~ 1 500	90 750	668	4.2	907	2.28
四川	J，T，	25 ~ 69	卤水	13.6	<2 400	75 100	1 380	10.12		
楚雄	K，J	45	<1	3.5	<1 000	28 000	176	5.0	140	0.30
雷琼	N，E	32 ~ 59	0.5 ~ 1	0.51	<1 600	5 400	43	8.4	108	0.28
合计				70		628 500	7 361		4 917	18.54

从上表看出：（1）我国 10 个主要沉积盆地在 2 000 米深度的范围内积存热水的资源量为 $63 \times 10^{12} m^3$，所含的热能为 7 361EJ（即 10^{18} 焦耳）。在可采资源的水量（没有算含盐卤水的四川盆地）为 4 917 亿 m^3，相当于 18.54 亿吨标准煤的能量。其采收率大约为 1%。（2）开发前景最佳的盆地是华北盆地、苏北盆地和汾渭地堑，它们都有厚度巨大、水质最佳的新近系。因此它们是钻成的地热井最多的地区；（3）中生代沉积盆地的存储条件和水质均欠佳。

根据这些特点，陈墨香等（1994）很清醒地指出：“沉积盆地型低温热水资源分布颇广，有一定开发潜力，但其焓值低。—热水资源作为能源看待，其潜力是颇为有限的。—决定了这些沉积盆地的热水资源在我国整体能源结构中不可能占有重要的位置，只宜作为辅助

性能源”。同时他们还认为地热能源与其他常规能源相比不是廉价的。而且对它们大规模开发会面临环境问题。

五 热储流体的特性

热储层中储藏的地热流体最关键的特性是它的温度。温度有多高呢？以前只有经过钻探才能知道，但是钻探是很费钱的。因此，人们就想方设法寻找其他方法。后来，根据一些经验和计算推测，如果在地面上有钙华沉淀，热储温度一般 $<150℃$；如果地面上出现了硅华，热储温度就可能高于 150℃。20 世纪 70 年代以来，由于地热科学的发展，可根据热泉水中所含的一些元素的比例推算出热储内部的温度，它们叫做地球化学温度计。使用地球化学温度计必须满足下列 5 点基本要求：（1）深部发生的反应只与温度相关；（2）用于计算地下温度的组分都有足够的丰度；（3）在热储温度的控制下地热水和岩体之间的反应达到平衡；（4）当地热水从热储流向地表时，由于温度的降低，组分间不发生再平衡；（5）来自系统深部的热水没有和浅部的冷水相混合。目前用得比较多的是二氧化硅温度计、钠钾温度计、钠钾钙温度计或经镁校正的钠钾钙温度计等。表 10—2 列举了一些常用的地球化学温度计的计算公式。各种地球化学温度计的应用都要求一定的假设条件，例如，二氧化硅温度计被认为是最佳温度计。它是假定石英在高温条件下，与地热流体的作用能达到平衡，当地热流体冷却之后，石英不会发生稀释和沉淀。因此它适用的温度范围很宽。图 10—13 是热水中二氧化硅浓度与温度的关系曲线。从图中可以看出，如果热水中的 SiO_2 浓度为 220 毫克/升，则热储温度为 190℃左右。钠—锂地球化学温度计是 Kharaka 等研究沉积盆地的地热水时提出来的。按照 Giggenbach 的研究，钾镁地球化学温度计适用于受冷地下水掺和的低温热泉。当地下温度大体处在 175℃ ~200℃以上时，大多数天然水中的 Na/K 比受到水与钠长石和钾长石的溶解平衡的控制，即钠钾地球化学温度计只适用于高温地热系统内部温度的估算。但是如果热水富含钙离子时，就得不出合理的 Na/K 温度，因此必须进行钙的校正，采用

Na—K—Ca 地球化学温度计。如果热水化学组分为酸性硫酸盐型水，利用表10—2中任何一个公式来计算它的地下温度只能得出十分离奇的、难以令人相信的结果。

表 10—2　常用的地球化学温度计

（公式中 C 值代表水溶二氧化硅的浓度；浓度单位为 mg/kg）

地球化学温度计	计算方程	适用温度范围
石英，无蒸汽损耗	T℃ =[1 309/(5.19 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
石英，最大蒸汽损耗	T℃ =[1 522/(5.75 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
玉髓	T℃ =[1 032/(4.69 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
α—方英石	T℃ =[1 000/(4.78 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
β—方英石	T℃ =[781/(4.51 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
无定形二氧化硅	T℃ =[731/(4.52 - logC)] - 273.15	T = 0℃ ~250℃
Na/K（Fournier）	T℃ =[1 217/(logNa/K + 1.483)] - 273.15	T > 150℃
Na/K（Trusdell）	T℃ =[855.6/(logNa/K + 0.857 3] - 273.15	T > 150℃
Na/K（Giggenbach）	T℃ =[1 390/(logNa/K + 1.750] - 273.15	
Na/Li (Kharaka et al.)	T℃ =[1 590/(logNa/Li + 0.779)] - 273.15	用于沉积盆地
K/Mg（Giggenbach）	T℃ =[4 410/(logK/√Mg + 13.95] - 273.15	用于低温热水
Na—K—Ca (Fournier, Fournier)	T℃ =[1 647/(logNa/K + β [log√Ca/Na + 2.06] + 2.47)] - 273.15 T < 100℃, β = 4/3, T > 100℃, β = 1/3	适用于富钙的热水

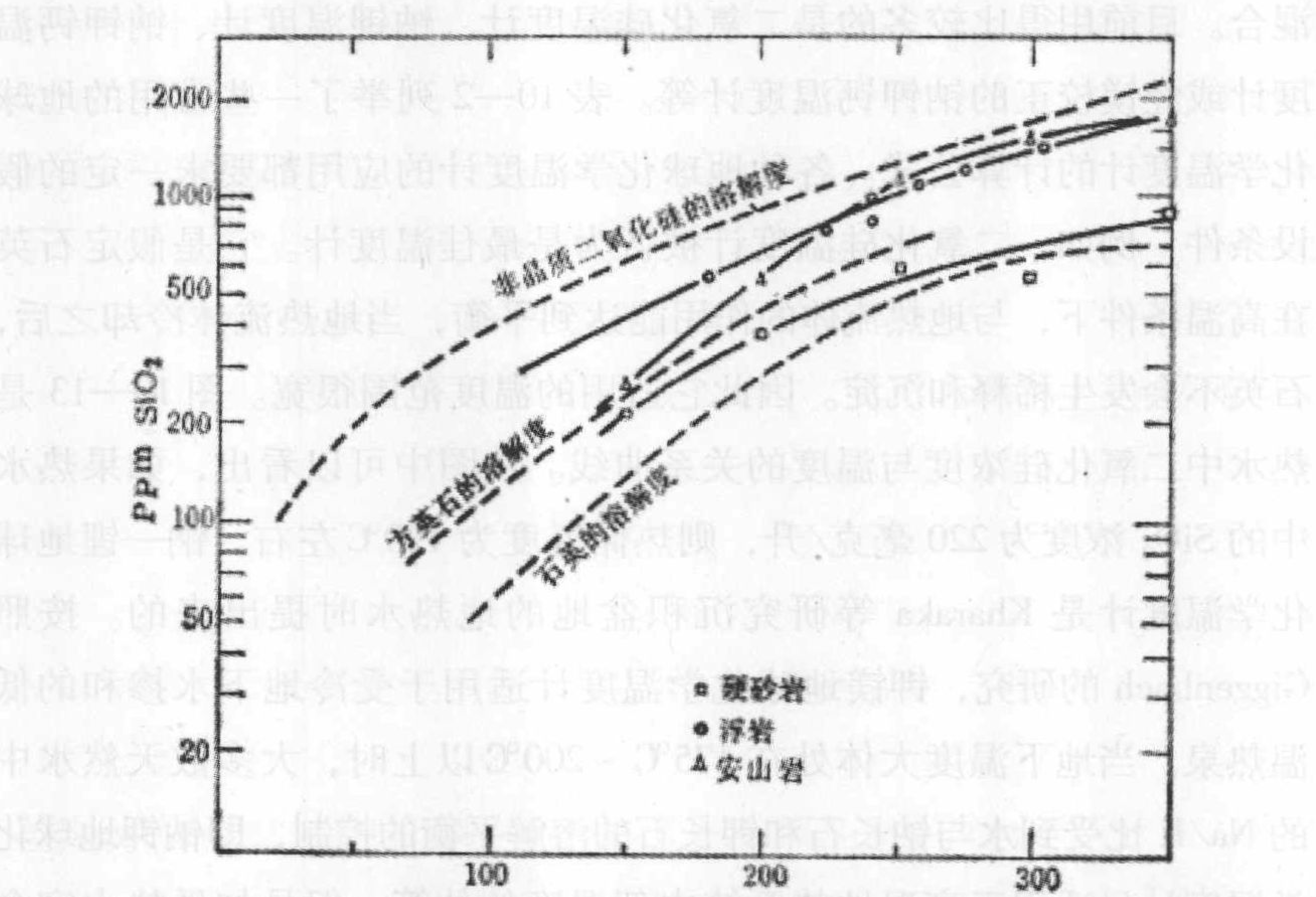


图 10—13　二氧化硅浓度与温度关系曲线

前面谈到，无论是热水系统、两相系统和蒸汽系统，都可能存在附加热源，如深埋的岩浆囊。它们都可能构成高温地热资源。虽然在热水系统、两相系统和蒸汽系统内的地热流体大部分是以液相存在，在特定的情况下部分热水可以汽化成蒸汽，形成汽水混合物，以单独的气相存在比较少见。但是它们的温度都高于150℃，因此，它们的物理性质明显会有别于温度较低的中低温水热对流系统或沉积盆地内储存的普通的温泉水。按照热工学的原理，当水汽化时，水分子不断从水中逸出，形成水蒸气，但同时也有分子从蒸汽进入水中。当在同一时间内逸出和进入的分子数目相同时，水和水蒸气处于平衡状态，这时的蒸汽称为饱和蒸汽，而其温度和压强称为饱和温度和饱和蒸汽压。在各种温度下的热水有其一定的饱和蒸汽压。实际上热水的温度与饱和蒸汽压之间呈指数函数的关系。如果热储流体为纯水，查饱和水和饱和蒸汽性质表可知：100℃时饱和蒸汽压为1.033 2kg/m^3；200℃时为15.855kg/m^3；300℃时为87.621kg/m^3；临界点（374.15℃）时为225.56kg/m^3。地下热水中常常含有一定数量的盐分，它有降低该液体饱和蒸汽压的能力。含盐度愈高，则饱和蒸汽压愈低；反之在压力相等时，地热水的含盐度愈高其沸点也愈高。

图10—14是热水与饱和蒸汽的温度—热焓曲线图。按照热力学第一定律，在某一状态下气体所具有的总能量（焓）等于内能和压力势能（流动功）之和。表达为：

$I = U + APV$

式中：U：1公斤气体的内能，kcal/kg

P：气体的压力，kg/cm^2

V：气体的比容，m^3/kg

A：功热当量，kcal/kg.m

I：1公斤气体的焓，kcal/kg

从图10—14看出，热水的热焓数值在低温时接近于摄氏温度值，当热水的温度升高后热焓值就开始偏离温度值，热水温度愈高偏离愈大。如100℃时热水的热焓值为100.09kcal/kg，150℃时为150.99kcal/kg，200℃时为203.59kcal/kg，250℃时为259.30kcal/kg，

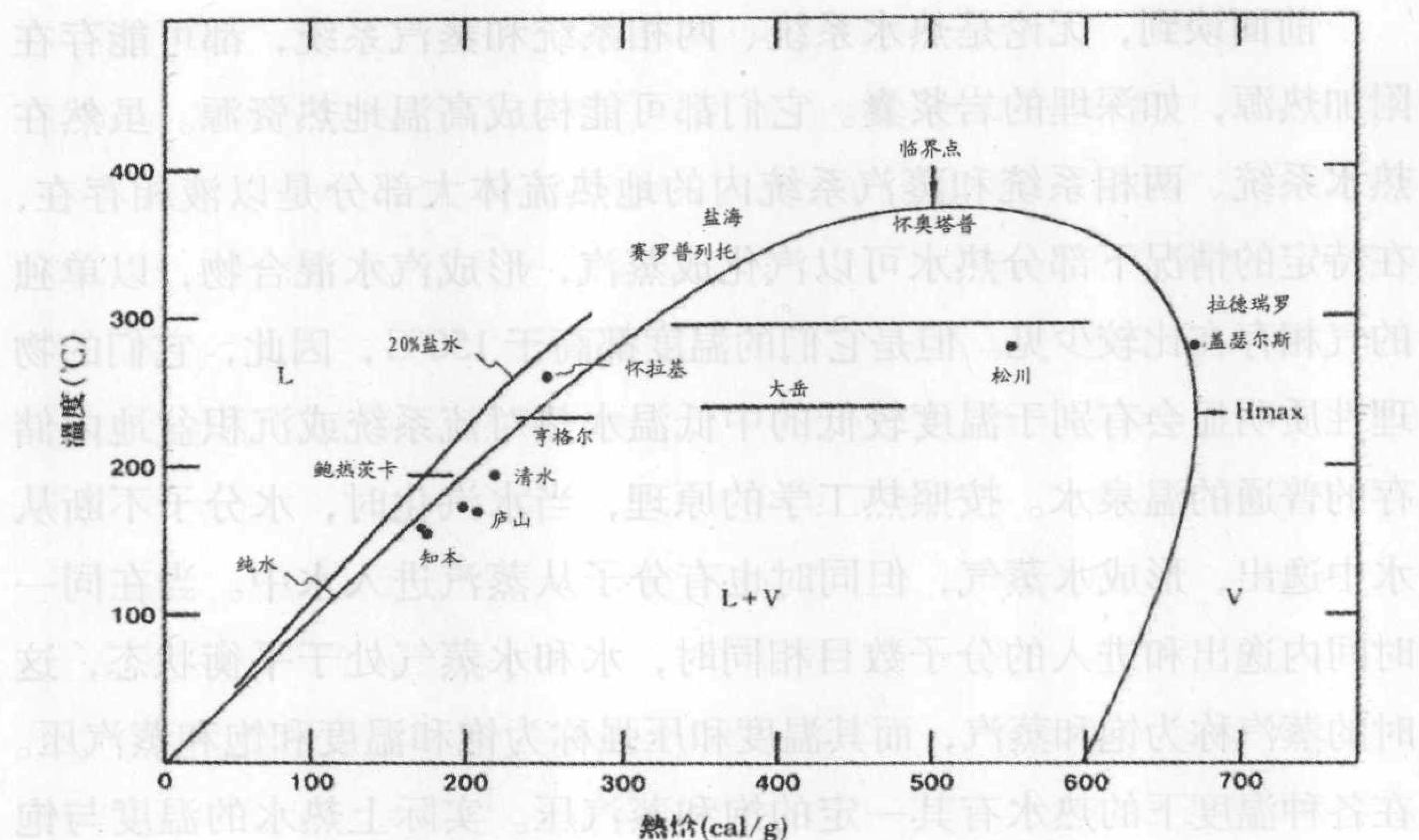


图 10—14 热水与饱和蒸汽的温度—热焓曲线图

300℃时为321.30kcal/kg，临界点（374.15℃）时剧增为503.30kcal/kg。因此热水的热焓值愈高就表示其可用的热能愈大，也即高温地热资源的利用价值远远大于中低温地热资源。在图10—15中，临界点左侧的曲线称饱和水线；临界点右侧的曲线称干饱和蒸汽线。饱和水线左侧的区域称未饱和水区，在这个区域内的任何一点都是未饱和水。干饱和蒸汽线右侧为过热蒸汽区，在这个区域的每一点都表示过热蒸汽状态。饱和水线和干饱和蒸汽线之间的区域叫湿蒸汽区，靠近饱和水线的点湿度大；靠近干饱和蒸汽线干度大。此区域内任何一点（不包括线上的点），都处于湿蒸汽状态，即都是汽水混合物。从干饱和蒸汽线看，饱和蒸汽的热焓值变化较小，但是比较特殊。在235℃附近有一个极大值，为669.8kcal/kg。在235℃以下，饱和蒸汽的热焓值都是保持在600kcal/kg之上，而且随着温度的上升逐渐加大。在235℃与临界点（374.15℃）之间，饱和蒸汽的热焓值随着温度的上升反而逐渐减少。直到临界点饱和蒸汽的热焓值与饱和水的热焓值完全一致(503.30kcal/kg)。在临界点，饱和水和饱和蒸汽已经完全混合为一，在温度高于临界点温度的区域也是如此。在过热蒸汽区的过热蒸汽的热焓值大于相同温度的饱和蒸汽的热焓值。

在图 10—14 的右侧，意大利的拉德瑞罗和美国的盖瑟尔斯两个干蒸汽田所生产的蒸汽落在过热蒸汽区之内，其热焓值大于同温度的饱和蒸汽的热焓值，接近于干饱和蒸汽的最高热焓值，因此可以推论这些蒸汽并非单纯由热水汽化而成，很可能是热田深部有巨大的热源供应额外的热能以促使形成的蒸汽过热。在饱和水线和饱和蒸汽线之间的湿蒸汽区，有日本的松川、大岳和新西兰的怀奥塔普，偏向右的点说明汽水比中汽的比例高，偏向左的点说明汽水混合物中水的组分偏大。从松川所占的位置来看，它明显有别于盖瑟尔斯和拉德瑞罗，它的蒸汽主要是湿蒸汽。美国盐海地热田地热水的热焓值明显偏离纯热水的饱和水线，而接近于含 20% 盐分的盐水的饱和线。世界上大多数热水系统它们的热水的热焓值分布于纯水的饱和水线的两侧，位于饱和水线左侧者有可能是因为热水含有一些盐分；也有可能是热水曾因汽化或其他原因改变了它的热焓。至于分布在饱和水线右侧的热水，其热焓值之所以偏高，主要是由于热水中混入了少量饱和蒸汽。

地热井在生产热水时常常会从钻孔中喷出湿蒸汽（即汽水混合物），这是因为钻杆钻入热水层后，热水在上升过程中由于压力突然下降而发生自动汽化。导致热水自动汽化的唯一条件是热水的饱和蒸汽压超过热水上部的水柱压力，水柱压力与水柱高度成正比，也与热水的水位有关。如果温度不变，热水水位愈浅，其上方的水柱厚度不大，水柱的压力就愈小，热水汽化的可能性愈大，即地下沸腾带的埋深浅。这种情况说明地下可能是一个热水系统，它可能是一个高温（>150℃）热水系统，也可能是一个中温（90℃～150℃）热水系统。不能在打钻时有汽水混合物（即湿蒸汽）喷出就说是过热水。地热田出现过热态只能在干蒸汽田（即蒸汽系统）方能出现。过热蒸汽只能出现在图 10—14 的右侧，即干饱和蒸汽线的右侧。

第十一章
地热能的利用

一　地热利用的春秋

人类利用地热，很早以前可能就已经开始。在那蒙昧的时代，我们的祖先用简陋的劳动工具从事狩猎、畜牧和农业生产，一天的奔波和劳碌，会令人疲惫不堪。如果附近有温泉，来到泉边洗一洗、水中泡一泡，疲劳顿消，精神倍增。有些人本来病魔缠身，又缺医少药，但到温泉中沐浴之后，病渐痊愈。我国劳动人民应用温泉治病，已有数千年悠久的历史。从而有“神农尝百草之滋味、水泉的甘苦，令民知所避就”。温泉的利用有史可据的应从西周末年开始，周幽王（公元前 781 ~ 前 771 年）在镐京城东的骊山温泉建过“骊宫”。秦始皇时（公元前 221 ~ 前 210 年）在骊山建造殿宇，砌石成池，赐名“骊山汤”。

自东汉魏晋南北朝以来，我国有关温泉的文献甚多，而且不断新发现许多温泉并当作药用。东汉时张衡（公元 78 ~ 139 年）曾作《温泉赋》云：“六气淫错，有疾疠兮。温泉汩焉，以流秽兮。蠲除苛慝，服中正兮。熙哉帝载，保性命兮。”阐述了温泉有治病、除秽、保健的功能。北魏郦道元（公元 466 或 472 ~ 527 年）所撰《水经注》称：“鲁山皇女汤，可以熟米，饮之愈百病，道士清身沐浴，一日三次，多么自在，四十日后，身中万病愈。”该书还记载了其余 39 处温泉，其中包括北京延庆佛峪口温泉。北魏元苌所著《温泉颂》写道：“盖温泉者，乃自然之经方，天地之元医，——千城万国之氓，怀疾枕屙之辈，莫不宿粮而来宾，疗若于斯水”。北周庾信所刻《温汤碑》中提及：“非神鼎而长沸，异龙池而独涌；洒胃湔肠，兴羸起瘠。”

据《海城县志》，唐朝贞观十八年（公元 644 年），辽宁汤岗子温泉被人发现。次年唐太宗东征高丽，贞观二十二年再征高丽曾驻跸于此，在泉中沐浴并医治伤兵。贞观十八年唐太宗在骊山温泉建“汤浴宫”。则天皇帝久视元年（公元 700 年），徐坚等奉敕撰《初学记》，记载温泉能治病的事实，列举了全国各地温泉的位置，温泉地区性质、功能以及有关温泉的诗词歌赋。天宝六年（公元 747 年）唐玄宗大兴土木，使骊山上下亭台楼阁错落，曲道回廊相连，并将温泉置于宫殿

之内，宫称“华清宫”，泉称“华清池”。当年的华清宫有六门、十殿、四楼、两阁、五汤，更有长汤十六所，十分壮丽豪华，但毁于安史之乱（公元755年）。到了宋朝，唐庚在《汤泉记》中探讨了温泉的成因，而胡仔的《苕溪渔隐丛话》将温泉分成硫磺泉、朱砂泉、矾石泉、雄黄泉和砒石泉五类。这说明我们的祖先对温泉已有相当的认识。至于有史以来，我国有关温泉的诗词歌赋、生动传神，搜集起来，可能还是一本厚厚的诗文集呢！

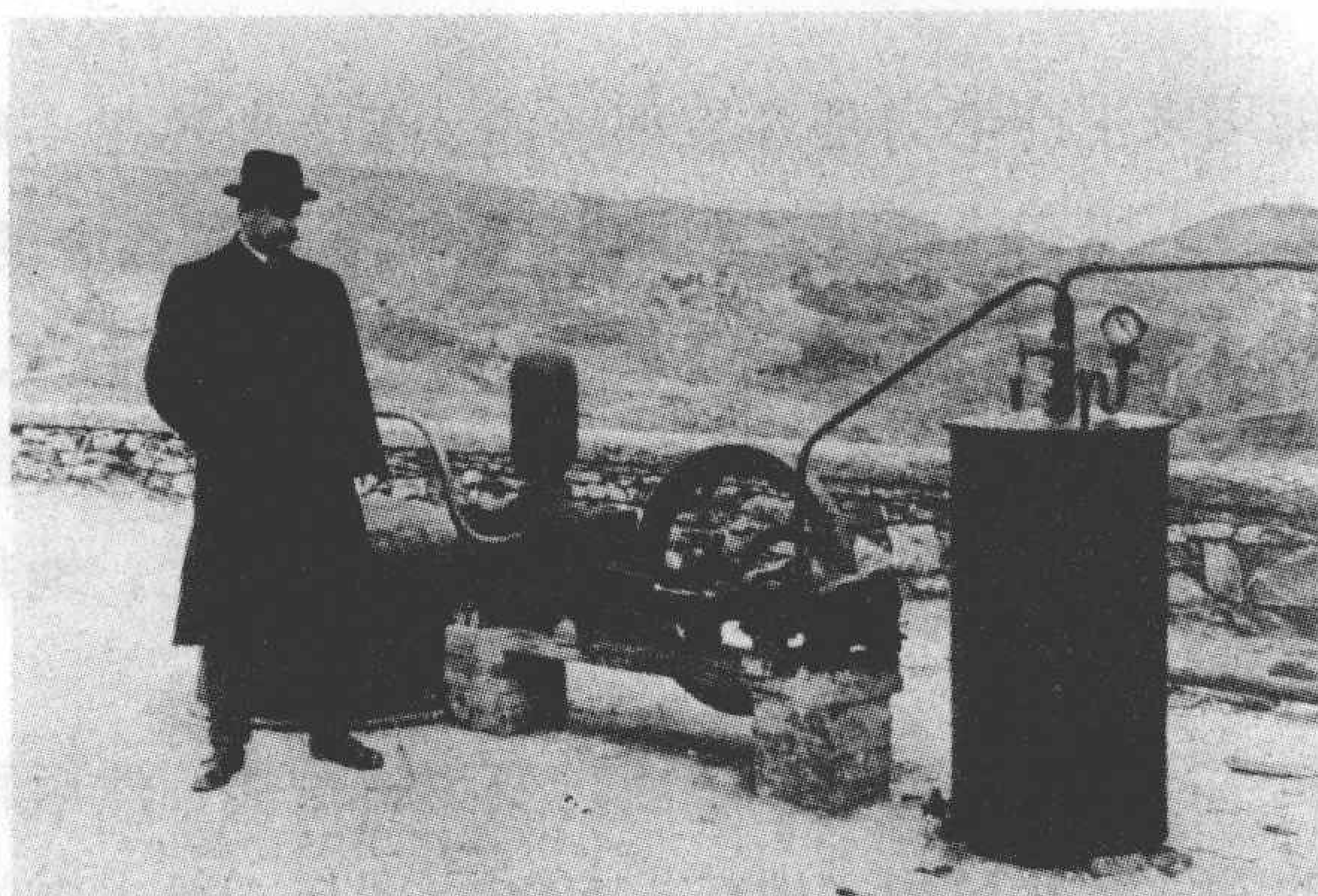
同样，在国外，对于温泉的利用也是从洗浴、治疗开始的。印度人认为温泉除了可以治疗麻风、痛风、风湿和皮肤病以外，还可以治疗甲状腺肿瘤、白斑病、代谢失调、神经炎和泌尿系统感染。美洲的印第安人利用温泉来治疗瘫痪、风湿、梅毒、糖尿病、神经痛、汞中毒、嗜酒狂以及子宫、肝、肾等顽症。而在欧亚板块与非洲板块汇聚的地中海沿岸，更是地质构造活跃、火山活动强烈、地热现象和地热资源丰富的地域，成为了火山学、地热学和近代地质学的发祥之地。在公元前3000年青铜时代开始，地热能的利用在地中海沿岸已经得到广泛的发展，但是，各地利用地热能的经验是相互独立的。公元前1500～2000年以前，温泉医疗得到了缓慢的发展。公元前7世纪开始，一些“地热工业”开始出现，当地人从地热区中提取矿物原料，如硫磺、芒硝等，利用它们来制造陶器、颜料、彩色玻璃等。在公元前6世纪，“地热市场”开始形成。从公元前1世纪到公元3世纪，是罗马帝国统治的巅峰时期，“地热市场”已稳固建立。地热能的产品和副产品如：钙华、膨润土、白榴石、火山灰水泥、珍珠岩、熔岩、火山碎屑岩和各种凝灰岩被广泛地、系统地用于建筑业，“市场”异常繁荣。与这些副产品的开发并驾齐驱的是地热洗浴医疗业也蓬勃发展。

大家都知道，火药是中国四大发明之一，它是战争和生产必用的主要物质。硫磺是制造火药的重要原料。我们的祖先早就知道从地热区中提取硫磺。公元1349年（元顺帝至正九年）汪大渊报道了台湾大屯火山区盛产硫磺。至于如何从地热区中生产硫磺，徐霞客和郁永河都分别作有生动的报导。徐霞客于1639年5月7日游硫磺塘的日记中曾写道：“其龃腭之上，则硫磺环染之，其东数步，凿池引水，上覆一

小茅，中置养硝桶，想有磺之地，即有硝也。——有人将砂圆堆成覆釜，亦引小水四周之，虽有小气而砂不热，以伞柄戳入，深一。二尺，其中砂有磺色，亦无热气从戳孔出，此皆人之酿磺者。”至今日，硫磺塘的人们仍袭用此种土法养磺种硝，1956 年产量曾达 5 000 千克。在 1968 年，腾冲县中药材收购站一次就收购了 1 223.5 千克。台湾大屯火山区的采硫方法与腾冲不同。在康熙三十五年（1696 年）冬天，福州火药库着火，派郁永河前往台湾采办硫磺。他在所著《采硫日记》中曾描述台湾土人采集硫磺的情况：“土黄黑不一，色质沉重有光芒，以指捻之，飒飒有声者佳，反是则劣。炼法捶碎如粉，日曝极干，镬中先入油十余斤，徐入干土，以大竹为十字架，两人各持一端搅之。土中硫得油自出。油土相融，又频频加土加油，至于满镬，约入土八、九百斤，油则视土之优劣为多寡。工人时时以铁锹取汁沥突旁察之，过则添土，不及则增油，油过不及。皆能损硫。土既优，用油适当，一镬可得净硫四、五百斤，否或一、二百斤乃至数十斤。关键处虽在油，而工人视火候，似亦有微权也。”郁永河在文中所提到的采硫方法，即油浮选法，与藏族人民目前在地热区中土法提硫的方法完全一样。

地热资源的大规模开发是从意大利人在拉德瑞罗提取硼砂开始的。自 1812 年起，拉德瑞罗人就将矿化的热泉水引到大锅中，用木材蒸干，然后从残渣中提取硼砂。15 年之后，到 1827 年，用喷气孔的热蒸汽代替了木材，以蒸干含硼的热矿水。以后不久，为了取得高温蒸汽，在拉德瑞罗打了第一批蒸汽井，从井中喷出的天然蒸汽既可作为燃料，同时又增加了硼砂的物质来源。

1904 年，在拉德瑞罗建立了第一座利用天然蒸汽发电的地热试验电站，虽然当时只亮了 4 个小小的灯泡，但预示着利用地热能是可以发电的（图 11—1）。1913 年，一座 230kW 的地热电站开始运行，标志着连续利用地热发电的开端。1914 年，意大利的地热发电达 2 750kW，1916 年迅速增到 12 000kW，到 1940 年猛增至 126 800kW。同时，在其他国家也注意到把地热能用于非电利用方面。如冰岛首都雷克雅未克，1930 年就利用地下热水建立了世界上最老、最大、最先进的城市供热系统。



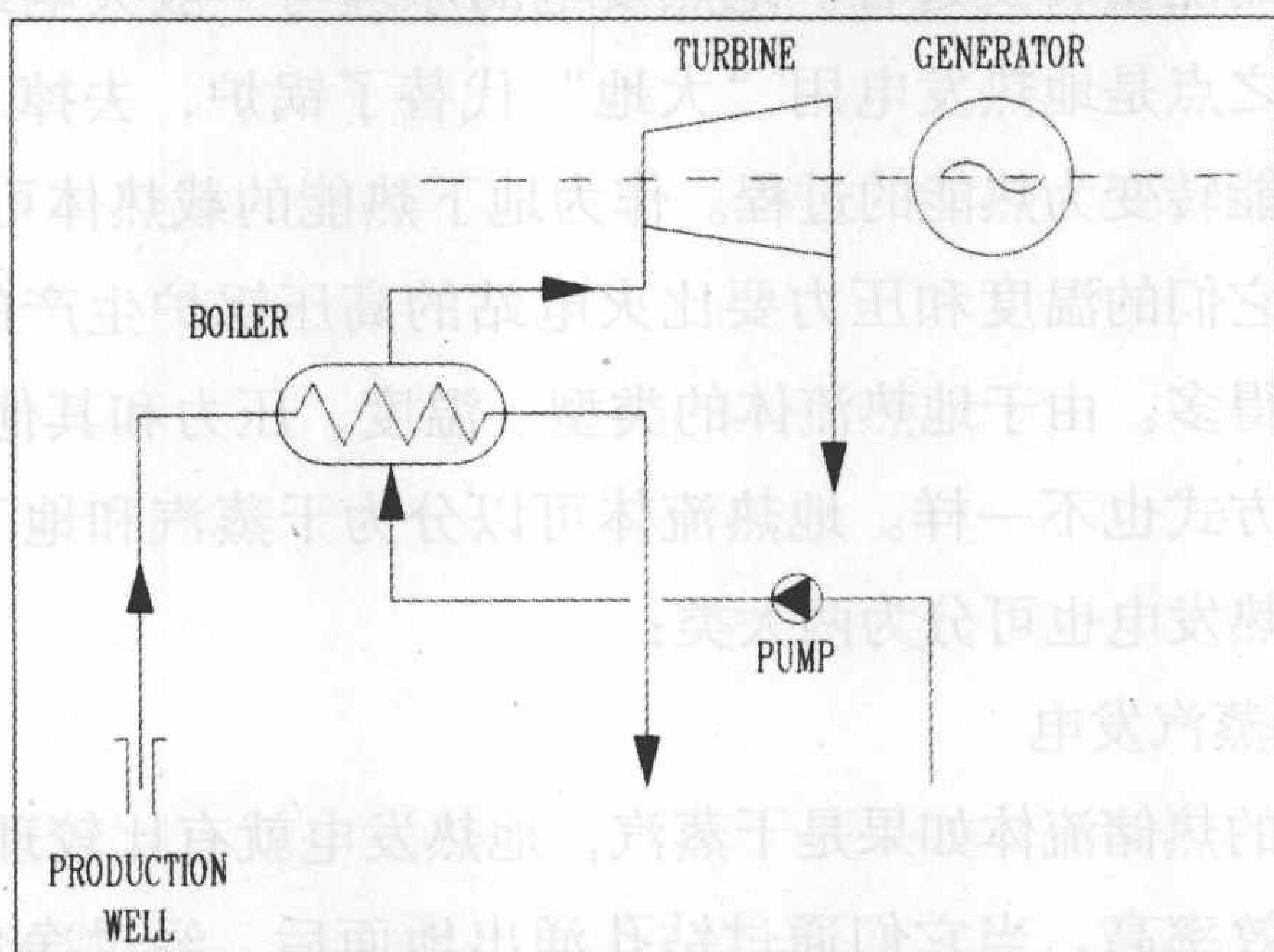


图11—1　(上) 1904年意大利拉德瑞罗的地热发电试验机组 (下) 1913年250kW地热发电机组所采用的循环系统
T: 汽轮机　G: 发电机　B: 蒸发器　Pr: 生产井　Pu: 泵

地热能用于发电和工农业生产标志着地热能的应用进入了一个崭新的时期。

二　地热发电的光辉

第二次世界大战以后，对能源的要求日益增多，在开发传统能源的同时，要求开发新的能源。特别是意大利在拉德瑞罗开发的实践，证明地热发电是大有前途的。许多国家都把地热能作为一种新能源来加以开发，特别是20世纪70年代的能源危机，促进了世界性地热发电

的热潮。

把地热能用来生产电力是容易理解的。因为地热田一般都出露在偏远地区，电力可以在热田内就地生产，然后输送到远方的居民中心。而且地热电站维修期短，能运转的时间长，即负荷因子高，不受降雨多少，季节变化、昼夜因素的影响，它能提供既便宜又可靠的基本负荷，使一个地区获得稳定的电力供应量，在这一点上，地热发电比水力发电还要优越。

地热发电实际上就是把地下热能转变为机械能，然后再把机械能转变为电能的能量转变过程。地热发电的原理与一般火电站并无根本区别，不同之点是地热发电用“大地”代替了锅炉，去掉了火电站由燃料的化学能转变为热能的过程。作为地下热能的载热体可以是蒸汽，或是热水，它们的温度和压力要比火电站的高压锅炉生产的蒸汽的温度和压力低得多。由于地热流体的类型、温度、压力和其他特性不同，地热发电的方式也不一样。地热流体可以分为干蒸汽和地下热水两大类，因此地热发电也可分为两大类：

1. 地热蒸汽发电

地热田的热储流体如果是干蒸汽，地热发电就有比较理想的热源，因为它的热效率高。当它们通过钻孔涌出地面后，经过净化，就可以直接进入汽轮机作功，并驱动发电机发电。这种发电系统最简单，称为背压式汽轮机发电系统。但是，它们的热效率比较低，常常只用于地热蒸汽中不凝气体含量特别高的场合，或者它排出的蒸汽能直接进行综合利用。

为了提高地热电站机组的发电效率，通常采用凝汽式汽轮机发电系统，从而使得蒸汽能在汽轮机中膨胀到很低的压力，作出更大的功。作功后的蒸汽排入混合式凝汽器，并在其中被循环水泵打入的冷水所冷却，最终凝结成水被排掉。

2. 地下热水发电

利用地下热水发电就不像利用地热蒸汽那样方便，因为利用地热蒸汽发电时，蒸汽既是载热体，又是工作流体（或称工质）。按照常规的发电方法，地下热水中的水是不能送入到汽轮机中作功的，必须将

汽和水分离，使水排掉，使汽进入汽轮机作功，这种系统称为“闪蒸系统”（或称减压扩容系统）；或者利用地下热水来加热某种低沸点工质，使它产生蒸汽，进入汽轮机作功，这种系统称为双流系统（或称“低沸点工质发电系统”）。此外还有正在进行试验的使地下热水（汽水混合物）直接进入汽轮机作功的“全流系统”。

图 11—2 是单级扩容法地热电站热力系统图，从地热井流出的湿蒸汽，经汽水分离器分离后，蒸汽进入汽轮发电机组发电，余下的热水则排掉不用。发电后的蒸汽排入凝汽器凝结为水后排走，凝汽器中不凝气体由抽气器抽出后排入大气中。但是，单级闪蒸往往是不经济的，因为从汽水分离器分离出来的蒸汽，数量很少，一般约为10%，而同等温度的90%的热水则被排掉了。为了利用这部分能量，以提高机组效率和地热电站的经济性，可以采用多级闪蒸发电系统。即使一次闪蒸后排出的热水进入另一个闪蒸器，以产生二次蒸汽，并进入汽轮机的中间压力级，与作了功的一次蒸汽混合后一起作功，最后一起排入凝汽器凝结成水排走，未被蒸发的热水仍然排掉。

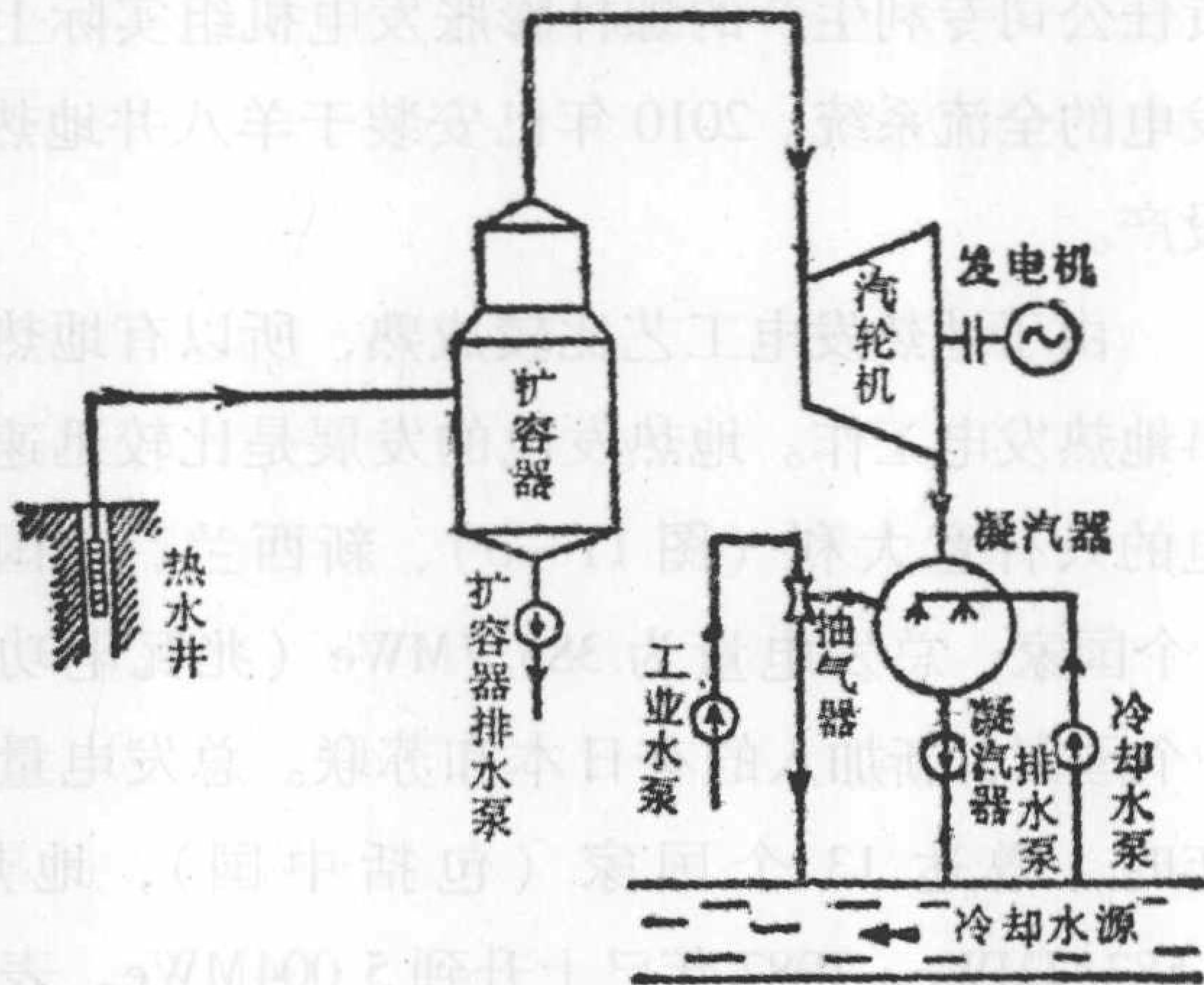


图 11—2　单级扩容法地热电站热力系统图

双流系统的地热发电不是直接利用地下热水产生蒸汽进入汽轮机作功，而是地下热水所带来的热量加热某种低沸点工质，使它变成蒸汽。然后，用低沸点工质的蒸汽去推动汽轮机作功，作功后的工质蒸汽从汽轮机排入表面式凝汽器，并在其中受冷却水所冷却，且凝结成液体，然后再循环使用。所用的低沸点工质的特点就是沸点比较低。如氯乙烷为12.4℃，正丁烷为 -0.5℃，异丁烷为 -11.7℃，氟利昂为 -29.8℃。

全流系统是目前正在研究的一种地热发电方法。它将井口产生的

汽水混合物直接送入一个膨胀机去膨胀作功，它们只在膨胀机的喷管中进行膨胀，把热能转变为动能，然后从喷管中喷出高速流体，驱动膨胀机的叶轮转动，产生机械功，最后带动发电机发电。20 世纪 30 年代发明的螺杆膨胀机在 70 年代用于美国作地热发电试验，但是由于地热流体因冷却结垢的问题而未能解决。近年来我国江西华电电力有限责任公司专利生产的螺杆膨胀发电机组实际上就是利用地下热水直接发电的全流系统。2010 年已安装于羊八井地热田、羊易地热田并正式投产。

由于地热发电工艺比较成熟，所以有地热资源的国家都在积极从事地热发电工作。地热发电的发展是比较迅速的。1960 年进行地热发电的只有意大利（图 11—3）、新西兰、美国（图 11—4）和墨西哥 4 个国家，总发电量为 385. 7MWe（兆瓦电功率）。到 1969 年增加到 6 个国家，新加入的有日本和苏联。总发电量达 673. 35MWe。到 1980 年时，增达 13 个国家（包括中国），地热发电的总发电量达 2 583. 7MWe。1987 年已上升到 5 004MWe。表 11—1 是自 1950 年以来地热发电的进展情况。表 11—2 是目前世界上进行地热发电的主要国家及发展状态。



图 11—3　意大利拉德瑞罗地热电站是世界上第一个地热蒸汽电站

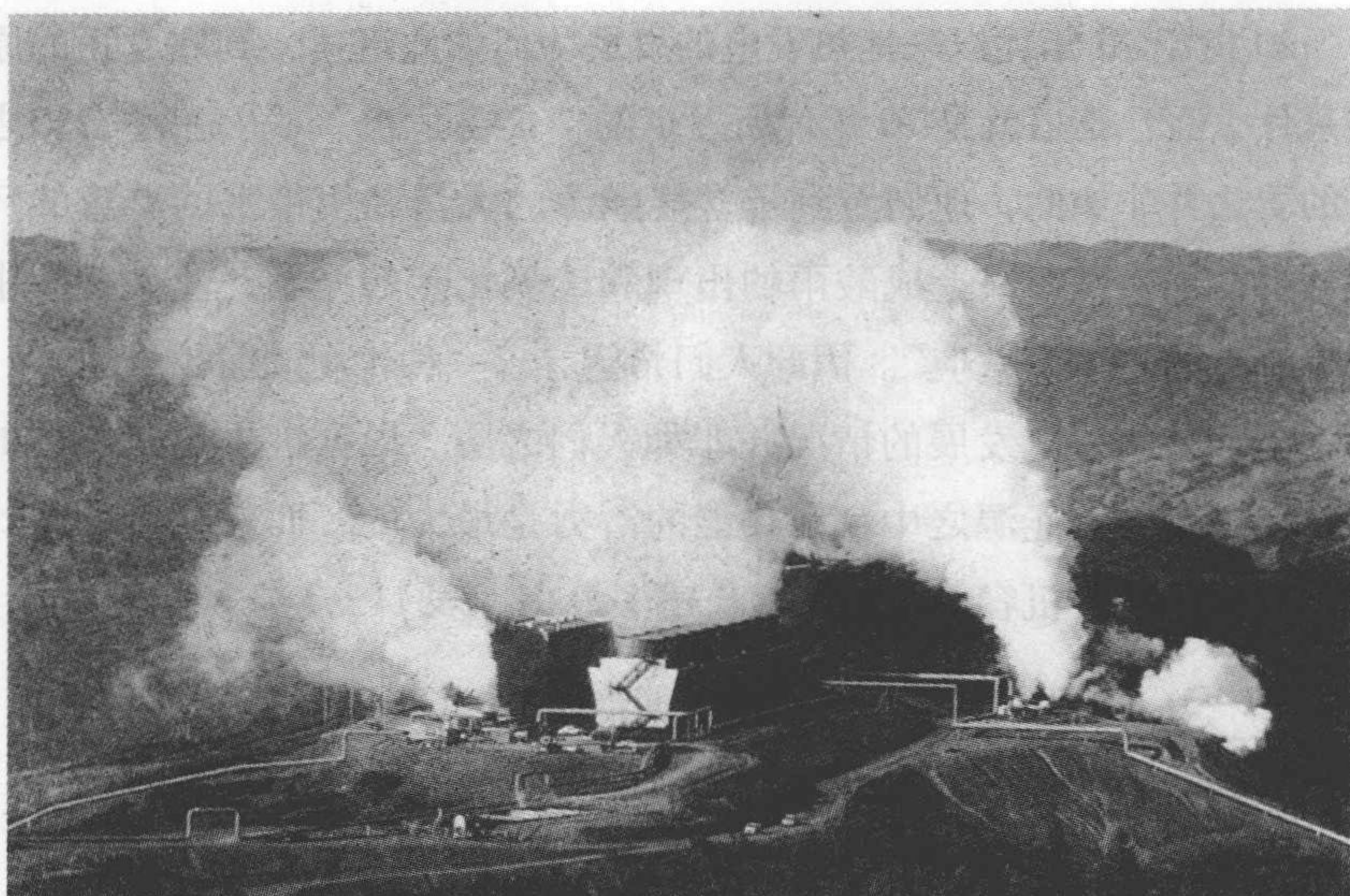


图 11—4　美国盖瑟尔斯地热电站是世界上最大的一个地热电站

表 11—1　全世界地热发电的进展（据 R. Bertani，2010）

年份	1950	1955	1960	1985	1970	1975	1980
装机容量（MWe）	200	270	386	520	720	1 180	2 110
产能（GWh）							
年份	1985	1990	1995	2000	2005	2010	
装机容量（MWe）	4 764	5 834	6 833	7 972	8 933	10 715	
产能（GWh）			38 035	49 261	55 709	67 246	

表 11—2　世界主要地热发电国家的现状与展望（据 R. Bertani，2010）

国家	2006MWe	2008MWe	2010MWe	4 年增长	2015MWe
美国	2 534	2 987	3 093	559	5 400
冰岛	172	569	575	403	800
菲律宾	1 931	1 970	1 904	−27	2 500
日本	535	535	536	1	535
印度尼西亚	797	1 172	1 197	400	3 500
萨尔瓦多	151	204	204	53	290
墨西哥	953	958	968	5	1 140
肯尼亚	127	169	167	40	530
意大利	791	811	843	52	920
哥斯达黎加	163	16	166	3	200
新西兰	435	635	628	193	1 240

20 世纪 70 年代以来地热发电的发展为何如此迅速，到底真正的原因是什么呢？难道就是 70 年代所发生的“能源危机”吗？一些有识之士的看法并非如此，他们看到了常规能源的大量利用带来的严重的环境冲突，如大量燃煤造成酸雨的出现和二氧化碳的净增，使大气圈中产生有名的“温室效应”。因此人们希望寻求一种代用的能源。

然而地热发电发展的情况并非如人们之愿。根据世界能源协会的统计，在可再生能源之中，地热能的潜力是最大的，而且利用系数比较高，但是其装机容量最小，增长速率最小（表 11—3）。

表 11—3　可再生能源潜力、装机容量和增长速率（据 Rybach，L.，2010）

能源类型	潜力（EJ/a）	2008 年装机容量（MWe）	利用系数（%）	生产电力（TWh）	增速（GWe/a）
地热能	5 000	10	75	65. 7	2
太阳能	1 575	16	14	19. 6	6
风能	640	121	21	222. 6	25
生物质能	276				
水力	50				
总计	7 541				

所以国际地热协会主席 Rybach（2010）认为：地热发电的装机容量如果仅仅依靠开发水热对流系统永远也超不过风能和太阳能光伏发电。因此他提议应该开发增强型地热系统，即干热岩系统。他认为一个能够生产电力的增强型地热系统的热储应该满足下列要求：

流体生产率	50 ~ 100kg/s
井口流体温度	150℃ ~ 200℃
总有效热交换面积	$\geqslant 2 \times 10^6 m^2$
岩石体积	$\geqslant 2 \times 10^8 m^3$
流体阻抗	$\leqslant$0. 1Mpa/（kg. S^{-1}）
水耗	$\leqslant$10%

有人认为增强型地热系统有着巨大的理论潜力。很多国家在从事这方面的研究工作。1972 至 1996 年美国在新墨西哥芬顿山钻了几口井，2. 8km 的浅孔，循环了 282 天，测得温度 155℃；4. 2km 深的深孔循环了 112 天，测得温度 183℃。英国于 1978 至 1991 年在康瓦尔的海

西期花岗岩中钻了2.2km的浅孔，循环了200天，测得的温度仅有70℃。日本从1985至2002年在一个破火山口中钻了几口井，最深2.2km，测得最高温度180℃。另外法国、澳大利亚都在从事这项研究，但都是刚刚起步。看来，能在一个增强型地热系统中制造“人工热储”的花岗岩，年代愈新温度愈高。

三　非电利用显神通

地热发电固然是开发地热能的重要方面，但是地热能的非电利用也是极其重要的。一方面是因为地热发电所要求的地热能是高热焓的，但是地球上许多地区只有中温或低温地热资源；另一方面是地热能的非电利用能更充分地利用地下热能。因为地热发电所产生的电功率是用下式求得：

$$We = QW = Q\left[(h - ho) - To(S - So)\right]$$

式中：Q是地热发电所需的地热流体量，W是地热流体的可用功，(h－ho)项是地热流体的总热量，To（S－So）项是表示在可逆过程中不能转换成功的热能。地热能的非电利用情况则不一样，一般它无需把热能转换成机械功，仅是要求热量的交换，如果进入利用系统的地热流体的焓为h，排出的流体的焓为hex，单位时间内所要求的热流体的量为Q，则所输出的热功率Wt为：

$$Wt = Q\,(h - hex),$$

也就是说其系统所需的热能量等于所要求的地热流体的量乘以地热流体的显热。因此，当We与Wt的量值相同时，其质并不相同，相差可达一个量级。

地热能非电利用的范围很广，既可以用于工业，又可以用于农业，也可以用于区域采暖，更可以用于医疗洗浴业。这取决于地热流体的温度水平。现在把各种地热非电利用所需要的地热流体的温度表示如下：

180℃　高浓溶液的蒸发，氨吸收式制冷，硫酸盐造纸浆工艺

170℃　硫化氢法生产重水，含硅藻土淤泥干燥

160℃　鱼类干燥，木材干燥

150℃　拜尔法生产的铝土干燥

140℃　高速率干燥农产品，制造食品罐头

130℃　糖在精制过程中的蒸发，蒸发法和结晶法提取盐

120℃　蒸馏法生产淡水，大多数多效蒸发，浓缩含盐溶液

110℃　干燥和养护轻质混凝土预制板

100℃　干燥有机物（海菜、牧草和蔬菜），洗涤干燥羊毛

90℃　干燥鱼干，强化融水

80℃　建筑物供热，空间加热温室

70℃　制冷的温度下限

60℃　动物饲养，温室以及温床加热

50℃　种植蘑菇，矿泉治疗

40℃　土壤加热

30℃　游泳池，生物降解，发酵，供寒带全年采矿用温水，防冻

20℃　鱼子孵化，养鱼

根据2010年的统计，全世界地热直接利用的总设备能力为50 583 MWt（兆瓦热功率），利用的国家共78个。表11—4是地热直接利用排名前15位的国家的情况。

表11—4　地热直接利用排名前15位的国家（据 Lund et. al.，2010，有删节）

国家	设备能力（MWt）	年利用热量（GWh/a）	主要利用方式
美国	12 611	15 710	地源热泵
中国	8 898	20 932	洗浴、直接供热
瑞典	4 460	12 585	地源热泵
挪威	3 300	7 001	地源热泵
德国	2 485	3 546	洗浴、直接供热
日本	2 100	7 139	洗浴
土耳其	2 084	10 247	直接供热
冰岛	1 826	6 768	直接供热
荷兰	1 410	2 972	地源热泵
法国	1 345	3 592	直接供热
加拿大	1 126	2 465	地源热泵
瑞士	1 061	2 143	地源热泵
意大利	867	2 762	区域供热
匈牙利	655	2 713	区域供热、温室
新西兰	393	2 654	工业利用

根据2010年印度尼西亚巴厘国际地热会议的资料，具有地热直接利用的78个国家，它们的总设备能力为50 583MWt，年利用热量总和为121 696GWh/a（Lund et al.，2010）。而11—4所列15个国家，其设备能力的和为44 621MWt，占总设备能力的88%；15个国家的年利用热量为103 229GWh/a，约为年利用热量总和的85%。

Lund等（2010）还提及：地热直接利用设备能力达到100MWt的国家，在1985年时为11个，1990年增加到14个，1995年为15个，2000年为23个，2005年为33个，2010年为36个。他们还认为，按人口平均MWt（兆瓦热功率）数最多的5个国家是：冰岛、瑞典、挪威、新西兰和瑞士。按国家面积平均MWt（兆瓦热功率）最多的5个国家是：丹麦、荷兰、冰岛、瑞士、匈牙利。如果从每年热利用量（TJ/a）考虑，按人口平均最多的5个国家是：冰岛、挪威、瑞典、丹麦、瑞士；按国家面积平均最多的5个国家是：荷兰、瑞士、冰岛、挪威、瑞典。由此可看出北欧诸国加上荷兰、瑞士是在地热直接利用方面比较先进的国家。

表11—5 1995~2010年各种地热直接利用类型的变化

类型	设备能力（MWt）				利用热量（TJ/a）			
	2010	2005	2000	1995	2010	2005	2000	1995
热泵	35 236 (0.70)	15 384 (0.54)	5 275 (0.35)	1 854 (0.21)	214 782 (0.49)	87 503 (0.32)	23 275 (0.12)	14 617 (0.14)
采暖	5 391 (0.11)	4 366 (0.15)	3 263 (0.22)	2 579 (0.30)	62 984 (0.23)	55 256 (0.20)	42 926 (0.23)	28 230 (0.28)
温室	1 544 (0.03)	1 404 (0.05)	1 246 (0.08)	1 085 (0.13)	23 264 (0.05)	20 661 (0.08)	17 864 (0.09)	15 742 (0.15)
养殖	653 (0.013)	616 (0.02)	605 (0.04)	1 097 (0.13)	11 521 (0.03)	10 976 (0.04)	11 733 (0.06)	13 493 (0.13)
农业	127 (0.003)	157 (0.006)	74 (0.005)	67 (0.008)	1 662 (0.004)	2 013 (0.007)	1 038 (0.005)	1 124 (0.01)
工业	533 (0.01)	484 (0.02)	474 (0.03)	544 (0.06)	11 746 (0.03)	10 868 (0.04)	10 220 (0.05)	10 120 (0.098)
洗浴	6 689 (0.136)	5 401 (0.19)	3 957 (0.26)	1 085 (0.13)	109 032 (0.25)	83 018 (0.30)	79 546 (0.42)	15 742 (0.15)

续表

融雪	368 (0.007)	371 (0.013)	114 (0.008)	115 (0.013)	2 126 (0.005)	2 032 (0.007)	1 063 (0.006)	1 124 (0.01)
其他	41 (0.001)	86 (0.003)	137 (0.009)	238 (0.027)	956 (0.002)	1 045 (0.036)	3 034 (0.016)	2 249 (0.02)
总计	50 582	28 269	15 145	8 664	438 071	273 372	190 669	102 441

注：表中括号内的数据是该年内9个利用项目所占的百分比。表中的“农业”指的是农产品的干燥。

从表11—5可以看出地热直接利用的方方面面和发展变化。在地热直接利用的早期，洗浴（包括医疗、疗养）方面所耗能量是最高的。而其他方面的应用包括区域供热、农业利用和工业利用诸方面。一般来说工业利用要求的温度较高，但是用途很广，可以用于烘干和蒸馏过程，也可以用于简单的工艺加热或制冷，或者用于各种采矿和原材料处理过程中的加温和去冰。在某些情况下地热流体本身也是一种有用的原料。某些热水含有多种盐类和其他有价值的化学物质，可以从中提取硼酸、碳酸铵和硫磺，从天然蒸汽中还可以提取某些有工业用途的气体，如CO_2、H_2S、H_2和少量甲烷、氮、铵和氩等。

农业利用要求的地热流体温度不高，一般低于100℃，高于20℃。可以用于建立地热温室，加温土壤、动物饲养、养鱼和农产品干燥诸方面。地热温室在地热直接利用的早期所占的份额还是比较高的。

地热能用于区域采暖是很诱人的。冰岛是这个领域的创始国，因为它地处寒带，一年有330~340天需要取暖，但本国又缺乏矿物燃料资源，而地热资源却十分丰富。在20世纪初，第一次试用于单独的农村房屋的取暖。到1928年，首都雅克雷末克附近钻出了热水，把它用来供给70间住房，一个室外游泳池，一个室内游泳池，一个学校的校舍。到1969年年底，全国40%的人口（8万人）居住在用地热供热的房屋中。区域空间加热，或更通俗的说法“采暖”，其装机容量与年利用热量过去与洗浴不相伯仲。但是近年来随着浅层地热能的利用，采暖用的装机容量所占份额逐年下降。

浅层地热能也称浅层地温能，它是位于常温层以下，蕴藏在浅层

岩土体和地下水中的低温地热资源。它是指在我国当前的技术经济条件下，地层恒温带至地表以下 200 米以内具备开发利用价值的地热能。浅层地热能因其品位不高（通常温度在 7℃ ~25℃），不能直接用来供暖和制冷，但是随着热泵技术和设备的进步与完善，使浅层地热能的采集、提升和利用已成为现实，这种技术称为“地源热泵”（Ground Source Heat Pump 或 Geothermal Heat Pump）技术。所谓热泵，通俗的说法就是利用电能转换为热能，就像水泵是利用电能来抬高水位一样。所谓地源热泵是一种通过电能利用地下浅层地热资源用于供暖或制冷的高效节能空调系统。夏季运行时，热泵机组的蒸发器吸收建筑物内的热量，达到制冷空调，同时冷凝器通过与地下水的热交换，将热量排入地下；冬季运行时，热泵机组的蒸发器吸收地下水的热量作为热源，通过热泵循环，由冷凝器提供热水给建筑物室内采暖，通过少量高位电能的输入，实现低位能向高位能转移。早在 1912 年瑞士的 Zoelly 首次提出利用浅层地热能作为热泵系统的低温热源，并为此申请专利。美国第一台地热源泵是 1946 年在俄勒冈州波特兰市联邦大厦安装的，到 1995 年估计全美国有 25 000 台到 40 000 台之间，并以每年 25% 的速度增长，到 2000 年时可能会达到 40 万台，预计 2010 年总装机量可达 150 万台。但是地源热泵是需要用电能来换取热能，在电能还不够发达的发展中国家是很难得到发展的。地热源泵真正意义上的商业应用也只有近几十年的历史。根据汪集旸等（2005）年提供的数据，在 2000 年世界上主要利用地热源泵的 27 个国家中属于亚洲国家的只有一个半，即日本和土耳其（它算半个），美洲有美国和加拿大，还有一个澳大利亚，其余 22 个半全是欧洲国家。他们安装的当量台数（12kW 为一台计）572 949 台，其中美国为 400 000 台，占总数的 70%。依次为瑞士（41 667 台）、瑞典（31 417 台）、加拿大（30 000 台）、德国和奥地利，其余国家都小于 1 万台。浅层地热能的利用得到地热界的承认是 20 世纪 90 年代的事，在 1995 年意大利佛罗伦萨世界地热大会上出现了几篇有关地热源泵的文章，并归类于“直接利用”栏内。自 1995 年以来，地热源泵的装机容量和年利用热量在“直接利用”中的份额是逐年增长，到 2010 年已分别达到 70% 和 49%。地热源泵的利用

目前似乎已成为地热直接利用的宠儿。

四　地热能的利用在中国

中国虽然是利用地热最早的国家之一，但是过去却停留在温泉浴疗和少量工农业利用诸方面。直到20世纪60年代后期至70年代初，我国才注意把地热能作为一种可供选择的新能源。自70年代开始，全国各省、市、自治区都进行了地热资源的考察、普查和勘探工作，为地热能的开发与利用奠定了基础。

（一）地热发电方面

在1970年开始的全国性地热热潮中，我国开始探索地热发电站的建设，先后在一些地区建立了一批小规模的地热试验电站（表11—6）。

表11—6　我国地热试验电站一览

电站地点	电站容量（kW）	工作流体温度（℃）	热力系统	工质	建成年月	状况
广东丰顺1号	86	91	一级扩容	水	1970年	已停运
河北怀来后郝窑	200	79	中间介质	氯乙烷，正丁烷	1971年	已停运
江西宜春温汤	50	66	中间介质	氯乙烷	1971年	已停运
湖南宁乡灰汤	300	92	一级扩容	水	1974年	已停
广西象州	200	73～77	一级扩容	水	1974年	已停运
广东丰顺3号	300	91	一级扩容	水	1976年	已停
广东丰顺2号	200	91	中间介质	异丁烷	1977年	已停运
辽宁营口熊岳	100	75	中间介质	正丁烷，氟利昂	1977年	已停运
山东招远	200	91	一级扩容	水	1977年	已停运
西藏羊八井1号	1 000	137	扩容	水	1977年	已停运
台湾宜兰清水溪	3 000	约190	二级扩容	水	1979年	结垢停
西藏羊八井3号	3 000	<160	二级扩容	水	1981年	运行
西藏羊八井2号	3 000	160±	二级扩容	水	1982年	运行
西藏羊八井4号	3 000	<160	二级扩容	水	1985年	运行
西藏羊八井5号	3 180	<160	二级扩容	水	1986年	运行

续表

西藏羊八井 6、7 号	3 000 ×2	<160	二级扩容	水	1989 年	运行
西藏羊八井 8、9 号	3 000 ×2	<160	扩容	水	1991 年	运行
台湾宜兰土场	300	150	扩容	水	1986 年	结垢停
西藏噶尔朗久	2 000 ×2	105	中间介质	水	1987 年	结垢停
西藏那曲	1 000	114		异戊烷	1993 年	结垢停
羊八井螺杆机 1 号	1 000	170	全流	水	2010 年	运行
河北任丘螺杆机	400	95 ~ 105	全流 + 双循环	R123	2010 年	运行
羊八井螺杆机 2 号	1 000	170	全流	水	2011 年	运行
西藏羊易螺杆机	400	130 ~ 170	全流	水	2011 年	试运行

自 1970 年以来，在我国大陆东部利用 <100℃ 中低温热水在 7 个地点建立了实验性的地热电站。共 9 个机组，其中广东丰顺有三个机组。装机容量最小的为 50kW，最大的为 300kW。总装机容量为 1 636kW。大部分小电站的试验都取得成功，河北怀来后郝窑电站的装机容量虽然只有 200kW，但是实际上发电出力达到近 300kW，而且排放的热水一点也不结垢。一般是每一吨热水发一度电。这 7 个低温地热电站中除了广东丰顺 3 号和湖南宁乡灰汤两个机组因设备老化在几年前停运外，其余 5 处在 20 世纪 70 年代末期就已关闭。关闭的理由就是“不经济”。当时完全没有认识到地热资源是一种低碳的能源。另外台湾宜兰县清水溪与土场两个地热电站在 1995 年也因结垢严重而停止运转。

另一方面值得庆贺的是，1977 年 10 月 1 日，我国第一台 MW 级地热发电机组——羊八井地热电站 1 号机组试运转成功。它的发电量最多达到 700kW。但在试验初期，因汽轮机震动和井中结垢，时开时停，1978 年方得解决。1981 年 11 月羊八井地热电站第一台 3MW 机组投入试验，总装机容量增至 4MWe。同时羊八井与拉萨间 110 千伏高压输电线路交付使用，更加快了羊八井地热电站建设的速度。到 1991 年 2 月共安装 1 台 1MW、8 台 3MW 级机组和 110 千伏升压站。装机容量达到 25. 18MWe，占拉萨电网的 41. 1%，冬季供电量占电网的 60% 以上。从



图 11—5　羊八井地热电站（南厂）外景

而缓解了拉萨电网供电不足的矛盾，基本上满足了拉萨工、农、牧业日益增长的用电和人民生活物质文化需求的用电。羊八井地热电站的建成，国家投资是 20 629.3 万元，与拉萨火电厂每年发电 $2\ 000 \times 10^4$kWh 而政府须补贴 800 万元比较，其经济效益和社会效益都是极其显著的（图 11—5）。

遗憾的是羊八井地热电站的发展就此止步，即使 20 世纪 90 年代初，在羊八井钻成了工作温度达 200℃，单井发电潜力 12.58MW 的 ZK4001 孔，也未加以利用；再加上 1MW 试验机组退役，羊八井地热电站的装机容量下降到 24.18MW。羊八井地热电站已经超过 30 年，属于老年电站了，每年的发电量还在 1 亿 kWh 以上，年运行时间超过 6 000小时。2009 年发电 1.419 亿 kWh，其累计发电量达 24.1 亿 kWh。

自 1992 年以来我国大陆上地热发电的装机容量一直裹足不前，目

前在24个进行地热发电的国家中排名第18位，是什么原因导致我国的高温地热资源的利用在世界的排名一直处于落后的地位？是缺乏资源还是认识不足？笔者认为主要是认识问题，表现在：

（1）没有认识到地热发电产生的是基本负荷。世界上所有地热发电的国家都认为它所生产的电力为基本负荷，唯有中国是例外，把地热发电当成补充的能源，地热电厂只是为调峰而建。在开发二次能源时想到的总是传统的水力发电或火力发电。绝对不会想到地热发电。但是羊八井地热电站运行的实际情况却说明它所生产的是基本负荷。"羊八井地热电厂1992年以来没有扩展，拉萨周围也没有新建别的地热电厂。那是因为西藏建设了羊卓雍湖水电站项目，并于1997年投产发电。羊湖水电站虽然装机容量为105MW，但其年运行只有2 000多小时。羊八井地热电厂虽已进入地热发电的'老年'，但现在一年还运行6 000小时以上。地热电厂2006年7月的发电量占全年的6.28%，但12月的发电量占全年的11.73%。这说明了虽然地热装机只占总电网的12%左右，但羊八井的地热电力尤在冬季是拉萨供电的主要支撑。"（多吉等，2007）。从所引用的这段话可以看出：①自治区当时所关注的、寄以希望的是羊卓雍湖水电站。尽管那时羊易地热田的勘探报告已于1991年提交，认为该地热田具有30MW装机的建站条件，远景发电潜力可达50MW。②根据所列资料计算，羊卓雍湖水电站的负荷因子只有0.23；羊八井地热电厂的负荷因子达到0.685。基本是羊湖水电站的3倍。其实羊八井地热电厂年运行6 000小时与国际上一些地热电站相比只能算是中上水平。③在冬季由于环境温度的降低，地热电站的出力更大，这是其他类型的发电厂（特别是水力发电、太阳能发电）所不具备的。在冬季地热电站实际上是主力电站。

（2）没有认识到地热发电对全球环境影响远低于常规能源发电的影响。常规能源发电所要求的热量来自于燃煤和燃油等石化燃料或核燃料，带来的环境问题是排放大量的二氧化碳，使地球产生温室效应，从而导致全球变暖，对人类的生存造成巨大的威胁；同时排放出二氧化硫、二氧化氮和大量粉尘污染环境。可是利用地热能发电和供暖能实现低碳的能源利用。同时形成地热勘探、钻井、压裂、地面工程、

地热发电设备制作、人才培训、科学研究等相关产业链，开发低碳经济的增长点，即形成与之对应的低碳技术体系。表 11—7 是利用各种能源进行发电所产生的排放物的比较，地热发电的碳排放要比燃煤发电的低一个量级。

表 11—7　各种能源发电的排放物比较

发电类型	CO_2 排放量（g/kWh）	硫的氧化物排放量（kg/MWh）
地热发电	91	0.16
天然气发电	599	—
燃油发电	893	4.99
燃煤发电	955	5.44

（据 Bloomfield，K. K.，et al.，2003。）

当然上表所列的数值不同的研究者会有出入。有人认为当从天然气、油或煤作发电燃料时，二氧化碳排放量分别为：193kg/MWh（53.6t/TJ）、817kg/MWh（227.0t/TJ）和 953kg/MWh（264.7t/TJ）（Lund et al.，2010）。

（3）没有充分认识到地热发电技术的相对特殊性。地热发电的技术基本上雷同于燃煤电站的技术，有别之点主要在于供热，大地代替了火电站的锅炉。而大地这一锅炉的构造要复杂得多。几乎可以说一个热田一个样。在开发之前必须搞清楚该地热田的热储在哪儿，是层状的还是裂隙型的，储量有多大，在哪儿钻探，要钻多深。因此在地热开发的前期需要投入大量资金用于勘探，自 1986 年以后，国家取消了这项勘探投资，风险全部由开发单位承担，而地热开发风险巨大，令人望而却步。在开始发电生产以后还应该考虑成井如何管理，废水如何处理，能否做到零排放，结垢与腐蚀的研究，开发中如何监测。这些问题都是常规发电厂也是其他新能源发电厂的建设无需考虑的问题。因而认为地热的开发异常麻烦。不如风电、太阳能光伏发电方便；而水电站的建设更是驾轻就熟。

（4）高温地热资源丰富的西藏，地广人稀，工业薄弱，没有负荷，许多高温地热区远离人口密集的城镇，如果进行开发，可能没有用户，或者输电距离过远，经济上不合算。

就是这些原因促使我们国家不重视地热发电事业，才使它几十年来没有发展。不过，近年来随着地球环境的恶化，人类对于节能减排的呼声日高，我国也开始关注地热能源的开发。最近成立了西藏华电地热开发有限责任公司，准备开发西藏的丰富的低碳的地热资源，首先是开发青藏铁路沿线的高温地热系统，羊八井深部地热资源的开发以及羊易地热电站的建立。2011 年 1 月 21 日在台湾清水地热发电测试展示说明会隆重召开，台湾结元科技股份有限公司和上海盛合新能源有限公司合作，利用后者从美国引进的以氨—水混合物为工质的卡琳娜（Kalina）动力循环技术，针对宜兰县政府地热发电的 BOT 开发计划，目前已完成装机容量分别为 3MW 和 5MW 的清水地热电站发电系统的设计。其实这两个公司在 2010 年 11 月 20 日在清水就建了一个 50kW 利用卡琳娜系统的试验电站，并于 2010 年 12 月 21 日并网发电成功。

（二）地热能直接利用方面

如果说我国在地热发电方面差强人意的话，而地热直接利用在世界上却是名列前茅。从表 11—5 可以看出，我国在地热直接利用的装机容量屈居第二，仅次于美国，但在年利用热量上却夺得头筹。根据韩再生、郑克棪等人（2009）的统计：在全国地热直接利用的方式中，供热采暖占 18.0%，医疗洗浴与娱乐健身占 65.2%，种植与养殖占 9.1%，其他 7.7%。

地热供暖集中在北京、天津、西安、郑州、鞍山等大中城市以及黑龙江大庆、辽宁沈阳、河北霸州、固安、牛驼镇等产油区城镇，开发利用 60℃～100℃的中低温地热水和不属于常规地热能的浅层地热能进行采暖。在 2000 年，采暖面积为 1 100 万 m^2，2008 年连同地源热泵供暖面积已超过 3 000 万 m^2。表 11—8 揭示了 1990 年到 2005 年地热供暖情况。

表 11—8 地热供暖情况表（据韩再生等，2009）

类别	1990 年	1999 年	2005 年
地热供暖面积（万 m^2）	190	800	1 270
地热供生活热水（万户）	1	20	30
二氧化碳减排（吨）	3 087	12 999	20 635
氮氧化物减排（吨）	1 158. 65	4 878. 5	7 744. 6

2008 年我国利用常规地热资源供暖面积为 2 400 万 m^2，至 2009 年末达到 3 020 万 m^2，其中近半数在天津。天津市 2004 年地热供暖为 920 万 m^2,2007 年达 1 200 万 m^2，2008 年达到了 1 300 万 m^2。目前天津市有 100 万人口居住在地热供暖的房屋中，有 400 万人口享受地热生活用水。图 11—6 是天津东丽湖度假旅游区内供热站。在该区共钻了 8 口井，其中 4 口开采井，4 口回灌井，供暖面积为 145 万 m^2。

地热源泵的利用在我国主要是在 2004 年以后，年增长率超过 30%。开始利用地热源泵主要在北京，2006 年就达 369 项，总面积 738 万 m^2。后来居上的是辽宁省沈阳市，2007 年使用地热源泵供暖的面积为 1 848 万 m^2，到 2008 年增至 3 585 万 m^2，占沈阳全市建筑物供暖面积的 18%，设备能力达到 1 790MWt。图 11—7 是天津工业大学新校区

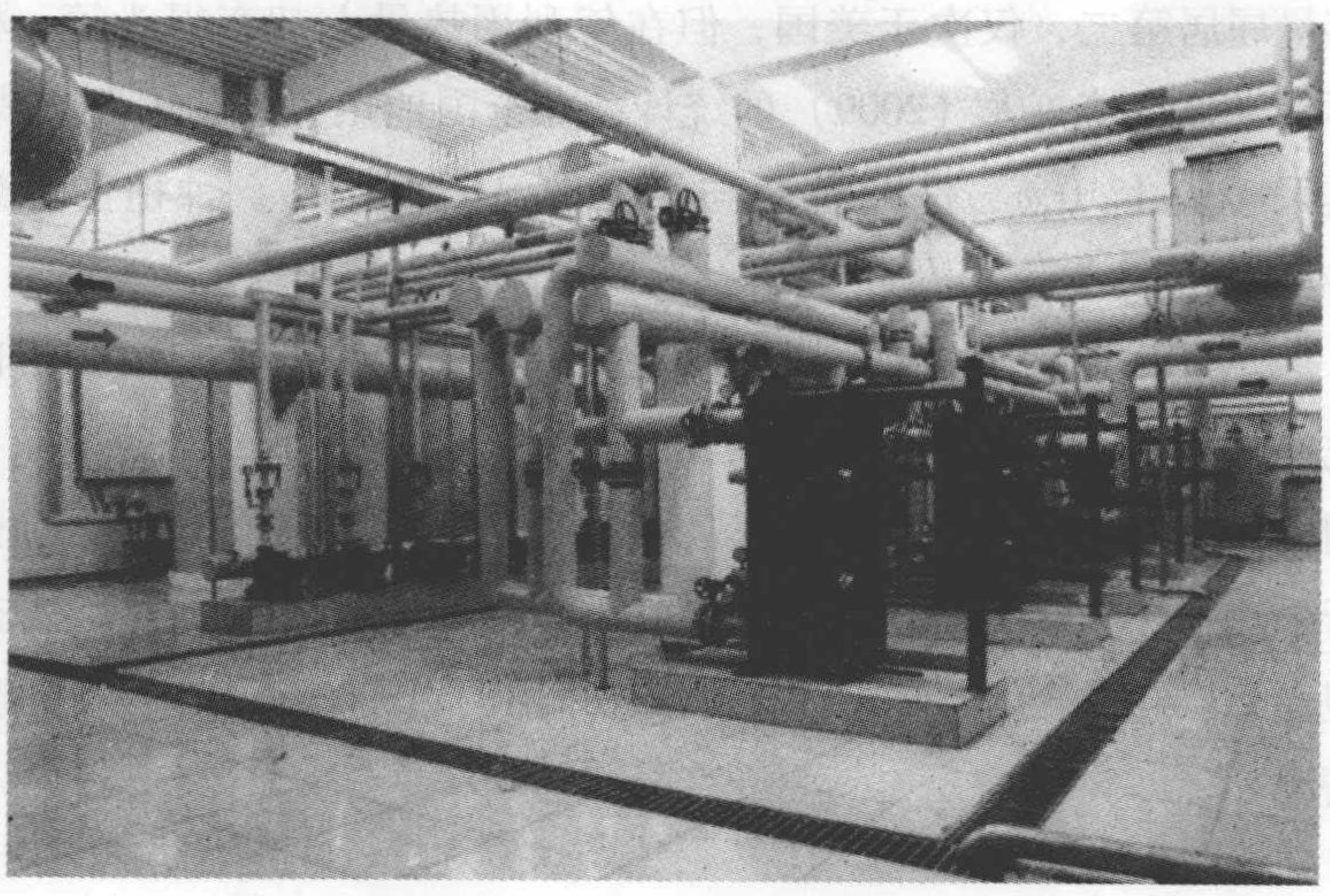


图 11—6 天津东丽湖度假旅游区内传统的地热供热站

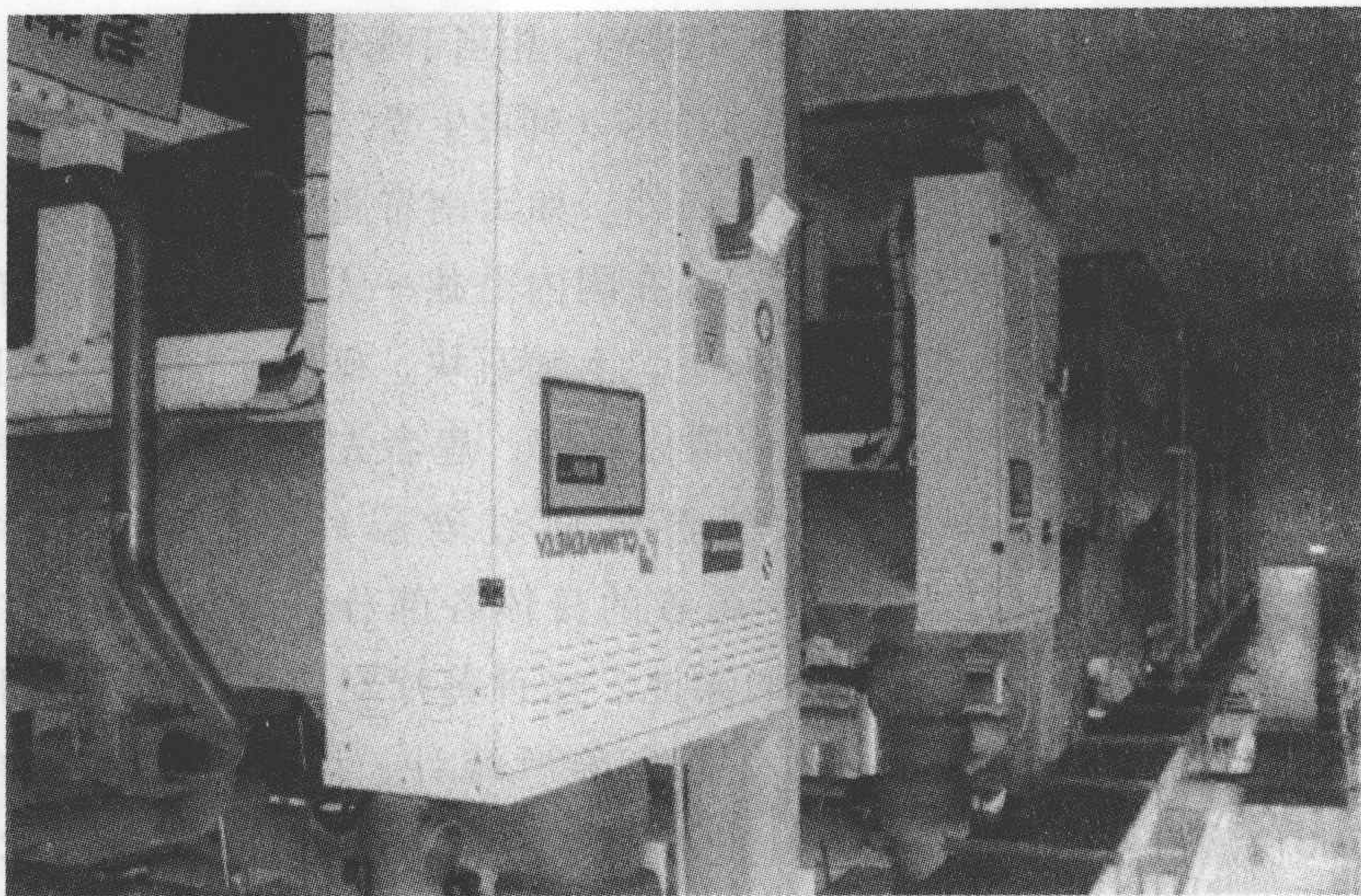


图 11—7 天津工业大学地热源泵泵房

利用地热源泵进行采暖和制冷的泵房。一期工程是供暖 18 万 m^2。

2008 年全国地热源泵总利用面积为 6 200 万 m^2，2009 年达到 10 070万 m^2，总装机容量约为 5 210MWt，年利用热量为 29 035TJ/a。当年在北京举行了第 29 届奥运会，中国政府为兑现“绿色奥运”在许多场馆采用了地热源泵装置。浅层地热能（地热源泵）的利用很明显具有三大优点：一是比其他常规供暖技术可以节能 50%～60%；二是不但替代和节省了传统的燃料能源，而且减少了污染，净化了空气，明显改善了环境；三是运行费用可降低 30%～70%（中国地热源泵网，2011）。

地热流体具有医疗保健作用，温泉（或人工地热井）是洗浴和医疗度假胜地，因为它具有较高的温度、含有特殊的化学成分与气体，很可能有少量生物活性离子及放射性物质，对人体各系统器官功能调节有明显的医疗和保健作用。利用地热可以水疗、气疗和泥疗。全国用于医疗保健的地热田已有 126 处，在那里建立了“温泉度假村”或“医疗康复中心”。它们集医疗、洗浴、保健、娱乐、旅游度假于一体。全国已建的温泉疗养院 200 余处，突出医疗利用的温泉浴疗点 430 处。全国现有公共温泉浴池和温泉游泳池 1 600 处。用于洗浴的地热水量

1.38 亿 m^3/a，利用的地热能 716.45MWt，相当于每年节约或减少 77.1 万吨标准煤，有 4 亿人次用地热水洗浴（韩再生等，2009）。

有些温泉治病的神效扬名海内外。如云南省腾冲县热海地热田的黄瓜箐，它所采用的蒸汽疗法，在国内是独一无二的。该地建有治病的蒸床，床底位于蒸汽地面上，上铺石块、砾石、细砂，再上铺以 3~5cm 厚的松针，最上部覆以草席，患者先上蒸床，卧于草席上，身盖毛毯。94℃ 的天然蒸汽通过砂层后，温度已降到 45℃~50℃，并均匀地作用于患者的身体各部分，每次蒸疗持续 40 分钟。然后进入蒸床旁侧的澡池。这种蒸疗对风湿性关节炎和风湿性腰痛有着特殊的疗效。据疗养所统计，1965~1973 年在 1 300份病例中，有 733 个属于此种病，占 56%；余下 567 例属 21 种病。在 733 个病人中，治疗无效的仅 47 例，占 6%；有效人数 686 人，占 94%。其中痊愈的有 354 例，占 48%。因此群众赞誉黄瓜箐："来时骑马、轿抬、拐棍带；走时稳步、挺胸、两腿迈。"黄瓜箐蒸汽疗法的神效，是由于它的热、汽、气、硫磺，还有含量高达 1 027.7 艾曼的氡射气，则尚待研究。

利用低温地热水进行水产养殖已遍及 20 多个省、市、自治区的 47 个地热田。建有养殖场 300 处，鱼池面积约 445 万 m^2。耗水量约占地热水总量的 5.7% 左右。普通的家养鱼一亩水面第一年产成鱼 100kg，但喜温性的罗非鱼等鱼种一亩水面一年可产成鱼 10 000kg，而且鱼苗可以越冬和繁殖。

地热温室和地热水灌溉以及农产品干燥是地热直接利用的一方面。目前我国有地热温室和大棚 133 万 m^2，所利用的地热能折合标准煤 21.5 万吨/a，占地热资源 2 年开采总量的 3.4%。天津建成了单体 2 万~3 万 m^2 的玻璃地热温室，兼有温度、湿度的自动调控，达到世界先进水平。图 11—8 是羊八井地热田的地热温室，充分利用地热发电后的 80℃到尾水作为温室的热源。

地热水的工业利用在我国规模较小，目前主要用于轻纺工业，如纺织印染、洗涤、制革、造纸与木材加工等。如京津地区的地下热水矿化度低、硬度低，可以不经过软化处理就能直接用于工业，既省

煤，又节水，且产品质地优良。如天津针织厂用热水染布，每年节约染料费3万~5万元，加上节省煤和水处理费，每年节约20万元。部分地热水还可以提取工业原料，如芒硝、自然硫。华北油田利用封存的油井深部的奥陶系进行地热水伴热输油，完全替代了锅炉热水伴热输油，取得了明显的经济、社会效益。

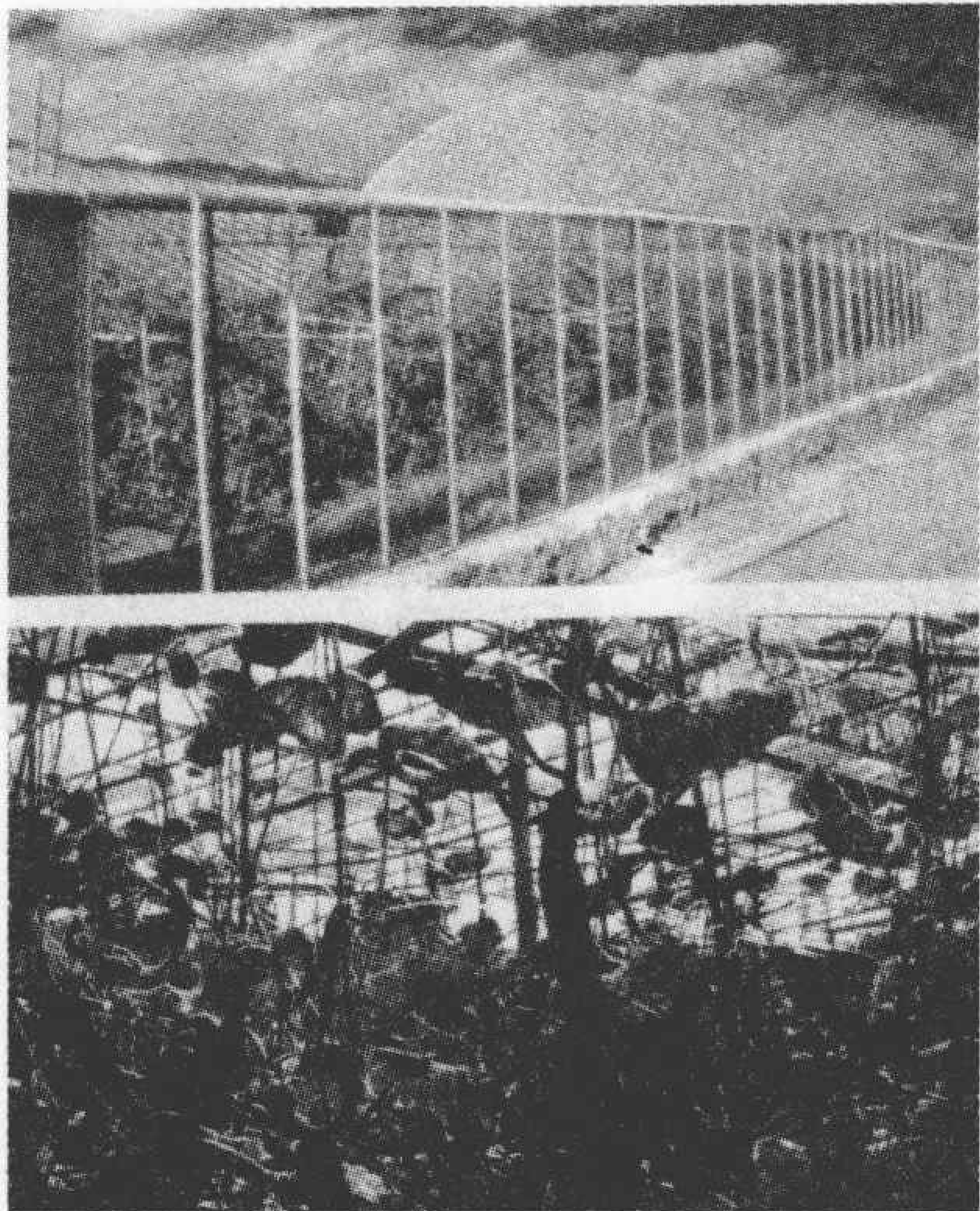


图11—8　西藏羊八井地热田的地热温室

2010年在印度尼西亚巴厘世界地热大会的报告，我国地热资源直接利用方面统计如下（表11-9）。

表11-9　中国地热资源直接利用概况

利用项目	区域采暖	地热源泵	地热温室	水产养殖	农业干燥	工业利用	洗浴疗养	总计
设备能力（MWt）	1 291	5 210	147	197	82	145	1 826	8 898
年利用热（TJ/a）	14 798.5	29 035	1 687.9	2 170.8	1 037.5	2 732.6	23 886	75 348.3

从上表看出，我国地热资源的直接利用，从传统地热资源（>25℃）来考虑，主要是洗浴疗养加上区域采暖。它们的份额占到83.5%。由于地热源泵的利用，使浅层地热资源（<25℃）的热量利用占到第一位，在总直接利用热量中占38.5%，如果加上传统的区域采暖，它们所用的热量占58%。地热源泵的加入显然是大大地增加了地热资源利用的份额。

煤，又节水，且产品质地优良。如天津针织厂用热水洗布，每年节约染料费3万～5万元，加上节省软化水处理费，每年节约20万元。部分地热水还可以提取工业原料，如芒硝、自然碱。华北油田利用封存的油井深部的奥陶系进行地热水伴热输油，完全替代了锅炉热水伴热输油，取得了明显的经济、社会效益。

2010年在印度尼西亚巴厘世界地热大会的报告，我国地热资源直接利用方面统计如下（表11－9）。

图11－8　西藏羊八井地热田的发电设备

表11－9　中国地热资源直接利用概况

利用项目	区域采暖	地热热泵	地热温室	水产养殖	农业干燥	工业利用	洗浴疗养	总计
设备能力（MWt）	1 291	5 210	147	197	82	145	1 826	8 898
年利用热量（TJ/a）	14 798.9	29 035	1 682.9	2 170.8	1 037.5	2 732.6	23 886	75 346.3

从上表看出，我国地热资源的直接利用，从传统地热资源（>25℃）来考虑，主要是洗浴疗养加上区域采暖，它们的份额占到83.5%。由于地热热泵的利用，使浅层地热资源（<25℃）的热量利用占到第一位，在总直接利用热量中占38.5%，如果加上传统的区域采暖，它们所用的热量占58%。地热热泵的加入显然是大大地增加了地热资源利用的份额。

后记

对中国的火山、温泉和地热能的匆匆巡礼，到此就告一段落。跑得如此之快速，也就很难欣赏任何的细部。但不知这种走马观花之后，能否得到一个虽笼统却并不模糊的印象呢?

但愿回答是肯定的。然而要做到这点实则是困难的，因为中国实在是太大了。笔者自1970年从事地热工作以来，历时虽届40载，然主要涉足西南一隅，而书中所载天南海北，实非一人之力所能及。为了回答“小引”所提的问题，不得不涉猎上百份文献。鉴于拙作的性质，实难一一举例；书中所引图件，虽已注明原作者，然也未经他们的首肯，在此只能报以深深的歉意；书中众多照片均为许多同行好友所提供，特在此表示深切的谢意。在编写过程中，当然也难以回避一些带有争议或正在探讨的问题，对此笔者难免会有自己的看法和倾向，有些可能是不成熟的，但愿能引起读者的研究与探讨。最后要提及的是，地热能的开发还是一个新生事物，让我们一起关心它，促进它，使它能在祖国的大地上结出丰富的硕果。

附 录

附录一　中国火山活动的历史记录

序号	火山名称	地点	时代与年龄	资料来源
1	白头山	吉林 长白山	1597 年 8 月 26 日 1668 年 4 月 1702 年 4 月 14 日	《李朝实录》、 《长白山史料断》
2	火烧山或老黑山	黑龙江 五大连池	1719（清康熙 58 年）	《黑龙江外记》
	火烧山或老黑山	黑龙江 五大连池	1721（清康熙 60 年）	《黑龙江外记》
3	龟山岛	台湾 宜兰县	1736—1795（清乾隆年间）	《噶玛兰志》
4	察哈彦	黑龙江 呼玛县	1796（清嘉庆元年） 1820（清嘉庆 25 年）	《黑龙江外记》 《宁古塔记略》
5	花莲	台湾 东海中	1853—1854（清咸丰 3 ~4 年）	Simkin et al. , 1981
6	澄迈—临高	海南岛	1883（清光绪 9 年）	《中国火山》
7	兰屿	台湾东海	1885（清光绪 11 年）	吕宗文（1995）
8	彭佳屿东北	东海中	1916 年 4 月 18 日 1927 年 6 月 1 日	柯狄弁 柯狄弁
9	卡尔达西	西昆仑山中	1951 年 5 月 27 日	西尼村
10	可可西里	可可西里湖附近	1973 年 7 月 16 日	Simkin et al. , 1981 *

* 该数据是据美国卫星数据解释，被收录于 Simkin et al. ,（1981）编的《世界活火山统计资料》，刘嘉麒等曾多次到彼处考察，尚未发现此火山。

附录二　中国史前的活火山

序号	地点	测试方法	年龄	资料来源
1	云南腾冲黑空山火山弹火山岩	钾氩法	7 ±7 千年 14 ±7 千年	S. Nakai et al. , 1993
2	云南腾冲马鞍山	铀系等时线法	7 千年	朱炳球等

附录三　中国火山喷发的 ^{14}C 定年结果

序号	地点	测试对象	年龄	数据来源
1	镜泊湖牡丹峰地下森林		5140aB. P.	盛中方等（1983）
2	吉林靖宇龙岗火山群四海顶子		1690aB. P. 1580aB. P.	刘祥（1989）
3	长白山黄松蒲	浮岩中　炭化木 炭化木	1220 ±90aB. P. 1365 ±140aB. P.	刘嘉麒 刘嘉麒
4	长白山黄松蒲河谷剖面	炭化木 炭化木	1275 ±75aB. P. 1285 ±80aB. P.	刘嘉麒 刘嘉麒
5	长白山乳头山南	炭化木	1365 ±75aB. P.	刘嘉麒
6	长白山乳头山	浮岩中树墩外部 浮岩中树墩中间	1070 ±70aB. P. 1310 ±90aB. P.	刘嘉麒 刘嘉麒
7	吉林松江河白西	浮岩中炭化木	2420 ±95aB. P.	刘嘉麒
8	吉林松江河小沙河桥头	浮岩中炭化木	1210 ±75aB. P.	刘嘉麒
9	吉林安图二道乡乳头村（天池北）	浮岩中炭化木	1050 ±70aB. P. 1120 ±70aB. P.	刘嘉麒 刘嘉麒
10	吉林安图三道白河	炭化木	1230 ±75aB. P.	刘嘉麒
11	吉林安图赤峰（天池东）	炭化木	1153 ±90aB. P.	刘嘉麒
12	吉林松江河小沙河（天池西）	炭化木	1410 ±80aB. P.	刘嘉麒
13	吉林安图和平营子	炭化木中心部位	990 ±95aB. P.	刘若新（1992）
14	天池北和平营子	白色浮岩中炭化木	1489 ±70aB. P.	谢宇平（1993）
15	白头山双目峰钻孔	黏土质淤泥层 淤泥层表层炭化木屑	2024 ±70aB. P. 1065 ±95aB. P.	刘若新（1996） 刘若新（1996）
16	天池周围	浮岩中的炭化木	910 ±45aB. P. 1435 ±75aB. P.	刘若新（1996） 刘若新（1996）
17	三道白河钻孔	碎屑流底部的炭化木屑	1095 ±80aB. P.	刘若新（1996）

续表

18	天池北黑风口	黑曜岩、浮岩中炭化木	4105 ±90aB. P.	刘若新（1996）
19	天池	火山碎屑中炭化云杉	1079 ~ 1345aB. P.	Gill et al.（1992）
20	朝鲜境内	火山灰（八卦庙期）	820 ~ 870aB. P.	金佰禄等（1994）
21	安图县神探窖	火山灰（八卦庙期）	895 ±70aB. P.	金佰禄等（1994）
22	安图县神探窖	火山灰（八卦庙期）	1000 ±90aB. P.	金佰禄等（1994）

附录四　中国温泉（温度≥80℃）一览

（温泉名之后第一个数字为天然泉口的温度，以℃表示；第二个数字为流量，单位为 L/s）

西藏

噶尔县那不如(85，10)，噶尔县巴尔 -1（93，?），噶尔县巴尔 -2（84，?），噶尔县索多 -1（85. 1，3），噶尔县索多 -2（85. 5，1. 5），普兰县齐吾贡巴（81，20），普兰县曲色涌巴（95，60），普兰县安部（85，10），普兰县丹果其萨（86，20），札达县哈拉沸泉（?，?），改则县高温泉（90，150），措勤县差女曲参（83，25. 7），仲巴县香古麻弄（109，?），仲巴县卓弄（82，?），仲巴县玉龙弄巴（81.7，?），萨嘎县如角（85，4），萨嘎县岗来 -1（88，3），萨嘎县岗来 -2（86，5），昂仁县打加间歇喷泉（83，40），昂仁县南独木（86，20），昂仁县拉布朗（85，?），昂仁县色米（86，5），昂仁县不罗巴（>78，0. 5），定日县鲁鲁下（86. 2，6），谢通门县榇古（84，3），谢通门县查布间歇喷泉（96. 4，20），萨迦县卡乌（88，20），谢通门县强布卡嘎（>81，30），岗巴县苦玛（85.7，8），岗巴县科作（85. 3，7），南木林县毕毕龙（87，10），南木林县色当（82. 8，5），南木林县桑木塞（86. 5，4），南木林县泮扎龙（>84，?），当雄县曲才（91，10），当雄县古令曲（85，10），当雄县羊八井（93，980），当雄县羊易（87，

15)，尼木县莫龙（85.6，35），安多县错那（83，20），那曲县谷露脉动喷泉（86，8），那曲县董翁（85，15），墨竹工卡县查曲沃（83，50），墨竹工卡县日多贡巴（84，19），措美县日若（84，20），措美县布雄朗古（86.5，10），措美县茶卡（83，2），措美县杀嘎朗嘎（85.5，20），措美县巴布的密（86.5，10），错那县洞嘎（86.5，5），隆子县突多（88，7.5），波密县长青（95.5，6），林芝县札曲（85，10），林芝县阿斯登-2（94，1）。

青海

贵德县扎仓寺（96，?），贵德县曲乃亥（82，?），都兰县（82，?），昆仑山布喀达坂峰东麓（86，?）。

四川

巴塘县茶洛间歇喷泉（96，10），巴塘县杠日隆（97，3），巴塘县章柯（94，2.65）甘孜县干音廓（90，?），理塘县嘎波库（85，25），理塘县曲开隆洼（86.5，?），理塘县耶姆擦（83，30），康定县榆林宫（87.5，13），阿坝县龙克曲可尔（85，2）。

云南

瑞丽市孔雀泉（95，3.6），盈江县澜泥坝（93，0.9），盈江县户勐（94，2.64），盈江县芒克（81，11），梁河县龙窝寨（96.5，0.2），梁河县丙彩（86，7.9），腾冲县朗蒲热水糖（98.7，6），腾冲县热海（95.8，?），腾冲县瑞滇（87，14），腾冲县攀枝花硝塘（96.8，1.5），龙陵县邦腊掌（98，9），龙陵县朝阳（81，?），保山市摆老塘（86，4），昌宁县鸡飞澡堂（81，1.5），云龙县烟登山（94.5，6.4），洱源县牛街—三营（81.5，7），洱源县龙马洞（84，0.2），凤庆县永新（97，3），凤庆县卷桥河（96，2），云县大控蚌（97，24），云县马鹿田坝（96，8.9），云县幸福（95，3.8），云县小定喜（94，0.97），澜沧县云南城（99，4），澜沧县蚂蝗坝（89，2），澜沧县酒井（85，?），澜沧县上允（80，?），勐海县勐满（99，5），勐海县曼召（97，8），

景洪市小街曼蚌（100.7，5），元阳县果统（81，3.8），元江县瓦纳（87.5，2），金平县勐坪（102，6.6），金平县麻栗寨（83，1.5），个旧市克勒（90，10）。

广东

丰顺县邓屋（88，15.5），丰顺县丰良（92，10.9），潮安县东山湖（84.1，1），阳江市横岗仔（98，17），信宜市西江（82，8），始兴县澄江（84，2），和平县热水坑（82，5.25），龙川县上坪（83，4.65），兴宁市南汤湖（83，3.76），紫金县九和（86，16.37），河源市黄村（86，3.83），五华县维民汤里（90，4.55），揭石县汤埔（86，6.75），中山市雍泊（88，1.78），中山市长沙埔（85，?）电白县麻岗（81，7.98）。

福建

南靖县南坑镇（82，?），平和县南胜村（81，2.7），平和县坂仔乡（80，5），厦门市莲花村汤岸（85，11），安溪县上汤村（87，5.6），德化县葛云（89，3.5），长汀县河田镇（80，11），连江县贵安村（84，34.7），清流县赖坊村（84，13），大田县太华镇汤泉（81，6）。

海南

保亭县新村（94，8），儋州市兰洋（82，4.32）。

广西

贺州市西鸡（83，1.1）。

湖南

宁乡县灰汤（88，1.96），汝城县热水墟（91.5，?）。

江西

燧川县汤湖（82，?）。

山东

招远市城关（88，?），青岛市即墨温泉（>80℃，?）。

内蒙古

宁城县热泉（85℃，?）

台湾

台北市新北投（98，16.67），台北市阳明山（80，16.67），台北市马槽（97，?），台北市七星山（97，3.33），新北市四黄子坪（94，3.33），新北市大油坑（96，1.66），新北市坑子坪（94，?），新北市大鹏村（90，?），新北市乌来村（84，8.33），宜兰县清水村（99，33.33），宜兰县土场村（98，8.33），宜兰县龟山岛（>100，6.31），宜兰县茂边（99，2.50），南投县庐山（98，25），南投县春阳（80，8.33），南投县精英（84，16.67），台东县鹿野溪桃林（85，?），台东县雾鹿（利稻）（97，?），台东县金俞1号（92，>8.3），台东县金俞2号（88，16.7），台南市关子岭（84，?）。

[General Information]
书名=中国的火山、温泉和地热能
作者=廖志杰著
页数=183
SS号=13115429
出版日期=2012.07